

电子工业技术词典

微波技术

国防工业出版社

R
73.6072
174.5

电子工业技术词典

微波技术

《电子工业技术词典》编辑委员会 编

正
入
作
书
目

三六四



内 容 简 介

《电子工业技术词典》是在一九六四年出版的《无线电工业技术词典》(试用本)的基础上作了较大修改和增补而编写的。本《词典》是一本为广大工农兵和干部提供的深入浅出、简明实用的工具书。它也可供从事某个具体专业的科技人员在了解电子工业整个领域的全貌、扩大知识面时参考。

本《词典》共有三十四章。正文中各词汇后附有英文对照,书末附有英文索引,合订本中还附有汉字笔画索引。在出版合订本之前,将先分册出版。各分册所包括的章节内容和出版先后次序,将视具体情况而定。

本分册是《词典》第二十五章微波技术的内容,它包括:基本概念与理论,波导与谐振腔,微波元器件与网络,微波应用等四节。

电子工业技术词典

微波技术

《电子工业技术词典》编辑委员会 编

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业登记证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092¹/₁₆ 印张 4¹/₄ 85 千字

1976年11月第一版 1976年11月第一次印刷 印数:00,001—27,000册

统一书号:17034·29-17 定价:0.47元

前 言

《电子工业技术词典》是在无产阶级文化大革命伟大胜利的鼓舞下，在学习无产阶级专政理论的热潮中，在电子工业发展的新形势下出版的。它是在一九六四年出版的《无线电工业技术词典》（试用本）的基础上编写的。

原《词典》自发行以来，曾受到广大读者的欢迎，为宣传、普及、推广电子技术知识起了一定的作用。十多年来，在毛主席革命路线的指引下，我国电子工业已有很大的发展，生产规模不断扩大，技术水平迅速提高，技术队伍日益壮大，电子技术的推广应用已引起国民经济各部门的重视，并在社会主义革命和社会主义建设中发挥出作用。目前，电子工业已成为国民经济的一个组成部分，电子工业战线的广大职工正在为实现第四届全国人民代表大会提出的宏伟目标而努力奋斗。为适应这一大好形势，更好地为无产阶级政治服务，为工农兵服务，为社会主义服务，我们对原《词典》进行了一次较大的修改和增补。内容力求反映七十年代电子技术的水平，释文尽量做到简明、通俗。目的是为了向要求对电子工业技术有一般常识的广大工农兵和干部提供一本实用的工具书；同时也可供从事某个具体专业的科技人员在了解电子工业整个领域的全貌和扩大知识面时参考。

本《词典》共分三十四章。其目录如下：

- | | |
|-----------------|-------------|
| 一、电工基础； | 二、基本电子线路； |
| 三、网络分析与综合； | 四、电波传播与天线； |
| 五、信息论； | 六、电阻、电容与电感； |
| 七、厚薄膜电路； | 八、磁性材料与器件； |
| 九、电子陶瓷与压电、铁电晶体； | 十、机电组件； |
| 十一、电线与电缆； | 十二、电子管； |
| 十三、半导体； | 十四、电源； |
| 十五、其它元器件； | 十六、通信； |

- | | |
|----------------|------------------|
| 十七、广播与电视； | 十八、雷达； |
| 十九、导航； | 二十、自动控制与遥控、遥测； |
| 二十一、电子对抗； | 二十二、电子计算机； |
| 二十三、系统工程； | 二十四、电子技术的其它应用； |
| 二十五、微波技术； | 二十六、显示技术； |
| 二十七、红外技术； | 二十八、激光技术； |
| 二十九、电声； | 三十、超声； |
| 三十一、声纳； | 三十二、专用工艺设备与净化技术； |
| 三十三、电子测量技术与设备； | 三十四、可靠性。 |

各章互有联系，并尽量避免章节间词汇的重复，故每章只有一定的系统性。正文前有章节和词汇目录，正文中各词汇后附有英文对照，最后附有汉字笔画索引与英文索引。本《词典》将先分册出版，各分册所包含的章节内容和出版先后次序将视具体情况而定。各分册无汉字笔画索引。

本《词典》的编写工作，自始至终是在毛主席革命路线的指引下，在党的领导下进行的。贯彻了“独立自主，自力更生”的伟大方针，坚持了群众路线，实行了工人、干部、科技人员和生产、科研、教学两个三结合，以及理论联系实际的原则。《电子工业技术词典》本身就是广大群众集体智慧的结晶。它的编写过程也反映了无产阶级文化大革命后我国出版战线上的新气象。

由于我们水平有限，加上时间仓促，虽然作了很大努力，但《词典》中还可能存在不少错误和不妥之处，恳请广大读者及时批评指正。

《电子工业技术词典》编辑委员会

一九七五年十月一日

目 录

一、基本概念与理论

微波.....	25-1	击穿.....	25-5
亚毫米波.....	25-1	波型.....	25-5
微波光学.....	25-1	色散.....	25-6
微波在大气中的传播.....	25-2	伴流.....	25-6
行波.....	25-2	电磁场方程组的矢量亥姆霍兹方程.....	25-6
反射系数.....	25-2	广义边界条件.....	25-7
行波系数.....	25-2	亥姆霍兹定理.....	25-7
驻波.....	25-3	本征值问题.....	25-7
行驻波.....	25-3	静电格林函数.....	25-7
电压驻波比.....	25-3	格林函数并矢.....	25-7
匹配.....	25-3	电象理论.....	25-8
插入损耗.....	25-5	保角变换.....	25-8
馈线系统的衰减.....	25-5	求矩法.....	25-8
隔离比.....	25-5	相控阵天线的微波理论.....	25-8
隔离度.....	25-5	电磁模拟律.....	25-8
传输线带宽.....	25-5	衍射的几何理论.....	25-8
传输线功率容量.....	25-5	耦合波理论.....	25-9

二、波导与谐振腔

馈线.....	25-10	螺旋波导.....	25-12
波导.....	25-10	介质膜波导.....	25-12
矩形波导.....	25-10	弯角波导.....	25-12
圆波导.....	25-11	套筒式波导.....	25-13
弯波导.....	25-11	细径可弯波导.....	25-13
波导弯头.....	25-11	细径软波导.....	25-13
折波导.....	25-11	陶瓷波导.....	25-13
扭波导.....	25-11	脊波导.....	25-13
异形波导.....	25-11	矩形软波导.....	25-13
环形波导.....	25-12	互锁型软波导.....	25-14
波纹波导.....	25-12	缠绕型软波导.....	25-14

无缝纹型软波导·····	25-14	周期性结构·····	25-17
焊缝皱纹型软波导·····	25-14	特种截面同轴线·····	25-17
电镀介质波导·····	25-15	带状线及微带·····	25-17
椭圆软波导·····	25-15	谐振腔·····	25-18
皱纹椭圆软波导·····	25-15	回波谐振器·····	25-18
铝椭圆软波导·····	25-15	介质谐振器·····	25-19
螺旋圆波导·····	25-15	同轴线空腔谐振器·····	25-19
介质膜圆波导·····	25-16	开放式谐振腔·····	25-20
H波导·····	25-16	超导腔·····	25-20
栅栏波导·····	25-16	边耦合腔·····	25-21
开波导·····	25-16		

三、微波元器件与网络

微波元(器)件·····	25-22	定向耦合器·····	25-29
密封窗·····	25-22	宽频带定向耦合器·····	25-30
传输线扼流接头·····	25-22	微带和带状线定向耦合器·····	25-30
矩形-圆形波导转换器·····	25-22	定向耦合器的过渡衰减·····	25-30
同轴线-波导转换器·····	25-23	定向耦合器的方向性系数·····	25-30
椭圆-矩形波导变换器·····	25-23	阻抗变换器·····	25-31
旋转关节·····	25-24	$\lambda/4$ 阻抗变换器·····	25-31
微波衰减器·····	25-24	矩形波导阻抗变换器·····	25-31
微带线衰减器·····	25-24	微带线阻抗变换器·····	25-32
波导匹配负载·····	25-25	同轴线阻抗变换器·····	25-32
短路活塞·····	25-25	阶梯阻抗变换器·····	25-33
匹配元件·····	25-25	介质阻抗变换器·····	25-33
矩形波导开关·····	25-26	线性阻抗变换器·····	25-34
铁氧体开关·····	25-26	微波滤波器·····	25-34
T-型接头·····	25-26	平衡-不平衡变换器·····	25-35
双T·····	25-27	宽带滤波器及移相器·····	25-35
魔T·····	25-27	微波交指型结构·····	25-35
折迭双T·····	25-27	一腔多模微波滤波器节·····	25-35
功率分配器·····	25-27	过波型微波滤波器·····	25-36
同轴线功率分配器·····	25-28	微带铁氧体四端环行器·····	25-36
微带线功率分配器·····	25-28	介质片移相器·····	25-36
三分贝隙缝电桥·····	25-28	微波移相器·····	25-36
三分贝定向耦合器·····	25-28	模拟式铁氧体移相器·····	25-37
波型变换器·····	25-28	闭锁式铁氧体数字移相器·····	25-37
波导环行桥·····	25-29	双模互易铁氧体移相器·····	25-38

波导模拟器·····	25-38	二极管波导开关·····	25-42
表面声波器件·····	25-38	微波延时均衡器·····	25-42
微波晶体管功率放大器·····	25-39	群分波器·····	25-43
微波晶体管振荡器·····	25-39	高次模滤除器·····	25-43
上变频器·····	25-39	杂模滤波器·····	25-44
微波低噪声参量放大器·····	25-39	铁氧体隔离器·····	25-44
谐波泵源带线变频器·····	25-39	铁氧体单向器·····	25-44
边导模器件·····	25-40	场移式单向器·····	25-44
耿氏体效应二极管振荡器·····	25-40	法拉第旋转式单向器·····	25-44
多模(微波)网络·····	25-40	铁氧体限幅器·····	25-44
毫米波集成电路·····	25-40	铁氧体反射式开关·····	25-44
微波混频器网络·····	25-40	磁调滤波器·····	25-44
半导体器件的封装网络·····	25-41	微波固体振荡器·····	25-44
环行器网络·····	25-41	体效应振荡器·····	25-44
微波铁氧体环行器·····	25-41	耿氏振荡器·····	25-45
微波铁氧体环流器·····	25-42	腔控振荡器·····	25-45
波导环行器·····	25-42		

四、微波应用

遥感技术·····	25-46	微波加热·····	25-50
微波遥感技术·····	25-46	微波传输太阳能·····	25-50
微波遥感器·····	25-46	微波在化学和化工上的应用·····	25-51
微波辐射计·····	25-46	微波等离子体发生器·····	25-51
微波全息术·····	25-47	微波波谱学·····	25-51
微波全息图·····	25-48	微波气象学·····	25-51
物波·····	25-48	微波天文学·····	25-52
参考波·····	25-48	射电天文学·····	25-52
缩尺因子·····	25-48	微波测位移系统·····	25-52
光学再现·····	25-48	微波厚度仪·····	25-52
单波束微波全息术·····	25-48	微波测温计·····	25-53
双波束微波全息术·····	25-49	微波穿透深度·····	25-53
离轴微波全息术·····	25-49	高频电场种子处理机·····	25-53
数字微波全息术·····	25-49	微波输电·····	25-53
微波计算机·····	25-49	微波生物效应·····	25-53
微波在农业上的应用·····	25-49	微波水份测定仪·····	25-53
微波在医学上的应用·····	25-50	微波加速器·····	25-54

高能加速器·····	25-54	微波理疗机·····	25-55
粒子加速器·····	25-54	微波自动网络分析仪·····	25-55
微波直线加速器·····	25-55	微波综合器·····	25-56
回旋加速器·····	25-55	波导不均匀测试仪·····	25-56

一、基本概念与理论

微波

microwave

微波一般是指波长从1毫米到1米(即频率从300千兆赫到300兆赫)的电磁波。按波段划分,微波波段可以进一步细分为:分米波、厘米波和毫米波。

微波具有以下主要特点:1.当波长远小于物体(如飞机、船舰、火箭、建筑物等)的尺寸时,微波的特点和几何光学很相似。如雷达就是利用了微波的这个特点;2.当波长和物体(如实验室中的无线电设备)的尺寸有同一量级时,微波的特点又与声波很相似。最简单的例子如微波号角天线,它与声学中的喇叭相似。

微波在物理学上的特点表现在它与物质的内部运动有着紧密的联系。利用微波可以研究一般顺磁物质的分子和原子核结构。在低温时,物体吸收微波量子可能产生显著效应。这是微波波谱学和量子电子学所依据的基本物理现象。

亚毫米波

submillimeter wave

亚毫米波是指波长从1毫米到0.03毫米(或频率从300千兆赫到10000千兆赫)的电磁波。这是一段介于微波和可见光(红外线)之间的电磁频谱。从广义来说,亚毫米波也归属于微波范围。

多年来,人们是从两个方向来研究亚毫米波这段电磁频谱。一个方向是从微波的一端,不断缩小空腔谐振器的尺寸,或利用磁控管或晶体的高次谐波,从而不断缩短振荡波长(或提高振荡频率);另一个方向是从可见光一端,利用受激发射的方法产生越来越

长的波长,从而接近并达到亚毫米波领域。两者中,后一途径看来更有前途。

亚毫米波有一系列的独特应用,包括:大气现象的测量,亚毫米辐射与等离子体相互作用,半导体及反铁磁体现象的研究,亚毫米波雷达和深空通信,等等。

微波光学

microwave optics

微波光学也称为准光光学,它是联系微波理论和几何光学的一门较新颖的学科。

由于数学上的困难,微波的衍射和传输问题往往很难严格地应用电磁理论来求解。因而,纯粹的几何光学方法早就用来近似地处理若干电磁波问题。一种经改进的更为准确的方法是利用渐近级数展开,它的第一项代表与几何光学相关的场。以后,这类方法得到很大发展,解决了不少衍射问题,包括各向异性媒质中电磁波的传播。

实验方面,在微波技术中研制了许多模拟光学元件的微波元件,诸如抛物面反射镜、介质和金属透镜,以及用于微波的法布里-珀罗干涉仪等等。这类技术亦称准光学技术。

另一方面,微波理论和技术也渗透到光学领域中。从建立电磁波理论那时起,人们早已认识到光波是一种波长很短的电磁波,并且用严格的电磁理论(麦克斯韦方程组)来处理一系列古老光学问题,诸如反射、折射定律,以及许多光学元件的分析与计算。随着微波理论和技术的发展,许多微波的概念和方法(诸如模式、耦合、匹配、传输线理论等)都已用于光学器件、特别是激光器件的研究中。

微波光学是一门正在发展的、微波与光

学互相渗透的边缘学科。

微波在大气中的传播

microwave propagation in atmosphere

微波在大气中的传播特性和气象有密切关系。随着波长的缩短,大气中的水或冰的质点所引起的电磁波散射作用将急剧增加,以至能够在分米波和厘米波波段阻碍通信。雨雪和云层的反射波可以使雷达站阴极射线管上出现明显的发光图形,给雷达观测带来极大的不便,不过,这一现象却可用来向飞行员预报危险。

雨点、冰雹和雪对波长很短的无线电波有很大的吸收作用,它们限制了利用毫米波来进行远距离传播通讯或测位。同时,空气中的氧对波长接近5毫米的无线电波有选择性吸收。

为了广泛利用微波远距离散射传播,应该研究大气折射率随高度的变化、大气偶然不均匀性对微波传播的影响等。

行波

travelling wave; moving wave

当传输线终端所接负载阻抗等于传输线的特性阻抗时,反射系数为零,线上只存在由振荡源向负载方向传播的电磁波,此电磁

波称为行波。对于有耗或无耗线,只要满足上述条件,就能获得行波。但有耗线上行波的振幅随距离的增加而减少,如图(a)所示。无耗线上行波的振幅不随距离而减小,如图(b)所示。

行波的特性为:在任一瞬间,线上的电压和电流是距离 z 的正弦函数,而在线上任一点的电压和电流依时间作正弦变化。故电压与电流不但与空间有关,而且与时间有关。所以它的相位为常数的点是单向移动的,其移动速度就是此行波的相速。

反射系数

reflection coefficient

在传输线上,任一点的电压(或电场强度)的反射波 U^- (或 E^-)对入射波 U^+ (或 E^+)之比,称为该点的电压(或电场强度)的反射系数。用 ρ 表示:

$$\rho = \frac{U^-}{U^+} = \frac{E^-}{E^+}$$

电压反射系数的模 $|\rho|$ 与驻波比 S 、行波系数 K 的关系为:

$$|\rho| = \frac{S - 1}{S + 1}$$

$$|\rho| = \frac{1 - K}{1 + K} \quad K = 1/S$$

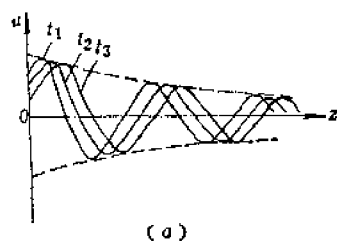
行波系数

travelling wave coefficient

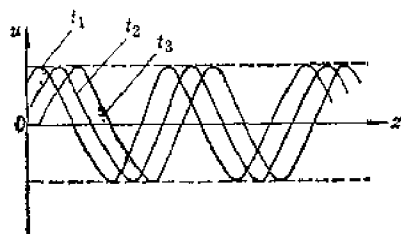
当传输线上反射系数在 $0 \sim 1$ 之间时,线上同时存在行波和驻波,这时线上某些点的电压振幅为最大值 U_{\max} ,某些点的电压振幅为最小值 U_{\min} 。最小振幅与最大振幅之比称为行波系数 K ,即

$$K = \frac{U_{\min}}{U_{\max}}$$

行波系数 K 愈大,表示线上行波成分愈大,驻波成分愈小。而行波系数的大小取决于负载阻抗与特性阻抗的匹配程度。行波系数 K 和反射系数 ρ 的关系是



(a)



(b)

电压行波沿线的瞬时分布图

(a) 有耗线; (b) 无耗线。

$$|\rho| = \frac{1-K}{1+K}$$

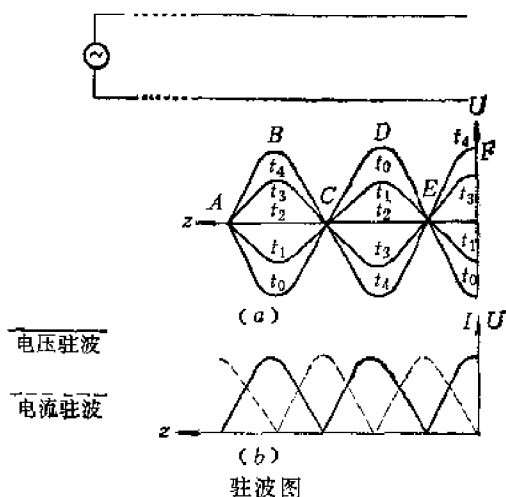
当负载完全匹配时, $K=1$, $\rho=0$ 线上没有驻波成分, 传输线处于行波状态。

驻波

standing wave

驻波是驻立不动的波。产生驻波的条件是: 无耗传输线终端不吸收入射波能量而全部将其反射, 这时反射系数的模为 1 (相当于终端短路或开路或终端接入纯电抗性负载)。

驻波的特点是各点波动的振幅为常数, 其大小随距离作正弦分布, 如图所示。驻波在波动时, 波中各点没有相位移。在线上某些点, 如图(a)中 A、C、E, 入射波和反射波相位相反, 就得到振幅为零的点; 在与上述点相距 $\frac{1}{4}\lambda$ 的各点如 B、D、F, 相位相同, 得到振幅最大的点; 中间各点合成场量的振幅介于最大值和零之间。当传输线上出现纯驻波时, 其电压和电流无论在时间和空间上都有 90° 相位差, 如图(b)所示。



(a) 电压驻波沿线的瞬时分布;
(b) 传输线终端开路时的驻波图。

行驻波

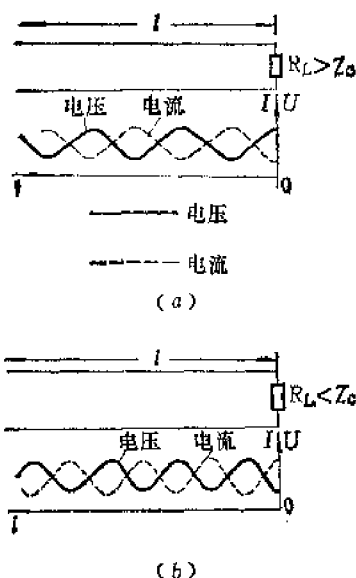
moving standing wave

当传输线终端接有复阻抗负载即 $|\rho| < 1$ 时, 线上将同时存在着行波和驻波, 线上电压或电流为行波与驻波之和, 故称为

行驻波。

由于 $|\rho| < 1$, 反射波振幅小于入射波振幅, 故合成波波腹不为入射波振幅的两倍, 波节不为零。

传输线最一般的工作状态是行驻波状态。电阻性负载所对应的电压和电流沿线分布如图(a)、(b)所示。图中 R_L 为负载电阻, Z_c 为传输线的特性阻抗。



电阻性负载行驻波电压电流沿线分布图

(a) $R_L > Z_c$ 时的情况; (b) $R_L < Z_c$ 时的情况。

电压驻波比

voltage standing wave ratio

传输线上电压最大值 U_{\max} 与最小值 U_{\min} 之比称为电压驻波比, 常用 S 表示。 S 是一个大于或等于 1 的实数。由于 S 易于测量, 通常用它表示匹配程度。当 $S=1$ 时, 为全匹配, 线上只载行波; 当 $\infty > S > 1$ 时, 线上载行驻波; S 愈大, 行波成分愈小, 驻波成分愈大; $S=\infty$ 时, 线上的波为纯驻波。在某些情况下 (如天线和微波器件等), 输入端的驻波比应尽可能地接近于 1, 以便提高传输线效率及减少击穿的危险。

匹配

match

设法在传输线终端附近额外产生一个反

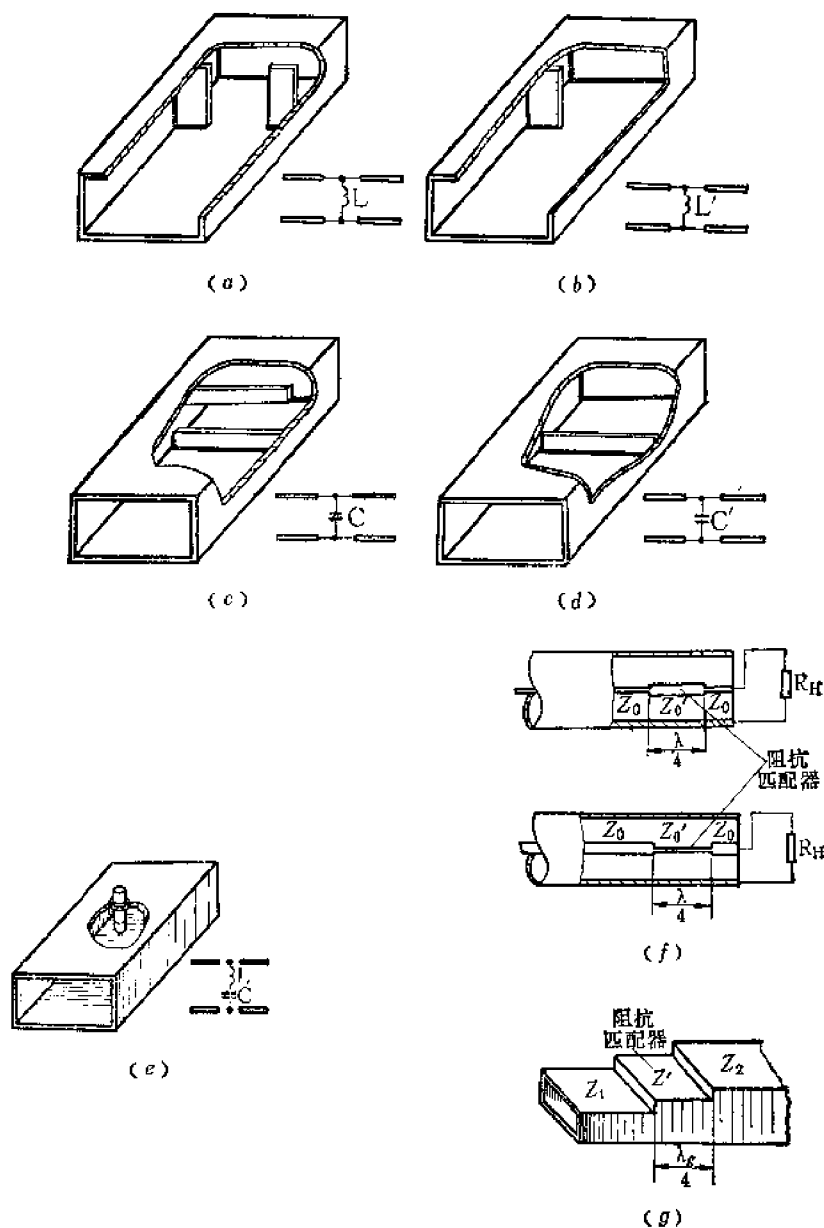
射波,使它恰好和负载所引起的反射波等幅反相彼此抵消,这个过程就叫做匹配。一旦实现完全匹配,传输线即处于行波工作状态。

实现匹配的方法有:

1. 反射波吸收法:利用铁氧体隔离器等将不匹配负载所产生的反射波全部或很大部分都吸收掉,而使信号源到隔离器之间基本上处于行波状态。

2. 电抗补偿法:在传输线中,适当加入匹配元件如纯电抗的膜片、销钉等,如图所示,使它所产生的反射波与原线中从负载所反射的波等幅反相,彼此抵消,从而达到匹配。此法的优点是匹配装置不损耗能量,传输效率高。

3. 采用各种形式的阻抗变换器如图所示。



几种常用的匹配元件形式

(a) 对称电感膜片; (b) 不对称电感膜片; (c) 对称电容膜片; (d) 不对称电容膜片; (e) 调抗销钉及其等效电路; (f) 同轴线 $\lambda/4$ 阻抗匹配器; (g) 波导 $\lambda/4$ 阻抗匹配器。

插入损耗

insertion loss

微波元件或器件未接入线路前, 负载吸收的功率与插入该元件或器件后负载吸收的功率之比称为插入损耗, 常以分贝表示。

插入损耗是由该元件或器件对电磁波的吸收和反射所致。

馈线系统的衰减

attenuation of the feed line system

发射机输出的功率 P_{sr} 与馈线终端 (天线、等效负载等) 所获得的功率 P_t 之比称为馈线系统的衰减 A , 常以分贝表示, 即

$$A = 10 \lg \frac{P_{sr}}{P_t} \text{ (分贝)}$$

引起衰减的原因有匹配不完全, 传输线的导电性不高所引的反射、辐射和热损耗。

隔离比

isolation

对一些微波元件 (如双 T 接头、正交波导定向耦合器、铁氧体环流器等), 通常将某一端的输入功率 P_{sr} 与隔离端 (即理想情况下没有输出的一端) 的输出功率 P_{ss} 之比称为隔离比 R , 并用分贝表示, 即

$$R = 10 \lg \frac{P_{sr}}{P_{ss}} \text{ (分贝)}$$

隔离度

isolation

即“隔离比”。

传输线带宽

bandwidth of transmission line

在某一频率范围内, 对传输线所要求的技术指标均能达到, 则称此频率范围为该传输线的带宽。

传输线功率容量

power carrying capacity of transmission line

传输线功率容量就是传输线所能承受的额定功率。

击穿

breakdown

击穿 (俗称打火) 现象指传输系统 (包括铁氧体及微波器件) 中, 通过高功率电平时所产生的火花放电现象。击穿现象一旦发生, 电磁波大部分或全部被反射回去, 将使整个系统无法工作。

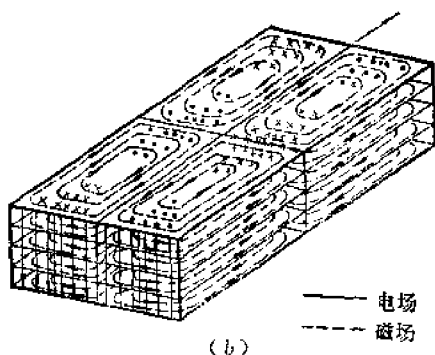
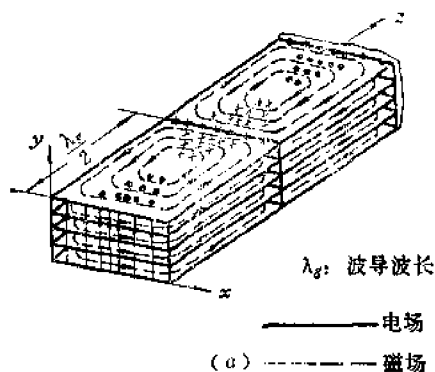
在传输系统中, 导致发生击穿时的高功率电平称为该系统的击穿功率或临界功率。

不同形式的传输线, 传播不同的波型具有不同的极限功率。临界功率的大小与馈线的尺寸、填充的介质、气压、湿度、波型、匹配形式与程度以及尖峰、毛刺、空隙等不连续性因素有关。

波型

wave mode

波型就是传输线横截面和纵截面内电磁场的结构图形, 即电磁波的分布情况, 图 (a) 和图 (b) 示出 H_{10} 、 H_{20} 两种波型的电磁场分



H_{10} 波和 H_{20} 波的电磁场分布
(a) H_{10} 波的分布; (b) H_{20} 波的分布。

布。一般说来,不同的波型有不同的场结构,每一种传输线具有与其相对应的一个基模。各种波型有一定的截止波长(λ_c),根据截止波长可绘出各种波型的截止波长分布图。截止波长最长的波型称基模,其它称为高次模。

波型是设计微波元件的依据和基础,其结构尺寸的决定首先要知道传输线内电磁场的结构分布。馈线中能量的激励、耦合等装置以及电磁波的传输特性都和波型有密切的关系。

色散

dispersion

在超高频技术中,色散通常是指无线电波的相速随振荡频率的变化而变化这一现象。波导中波的传播相速为

$$v_{\phi} = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}$$

式中 C ——光速;

f_c ——截止频率;

f ——工作频率;

ϵ_r ——相对介电常数。

它与振荡频率有关,都属于色散波。

在同轴线中,设 d 、 D 分别为同轴线内外导体直径,当 $D + d < \frac{2}{\pi} \lambda$ 时,线中传输 TEM 波,其截止频率为零,相速 v_{ϕ} 恒等于光速,与振荡频率无关,叫做无色散波。若取 $D + d > \frac{2}{\pi} \lambda$, 线中能传输高次型波如

H_{11}, E_{01}, H_{01} 等,其相速 $v_{\phi} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}$

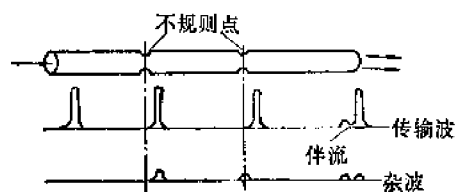
与振荡频率有关,因此为色散波。为了传输单一的 TEM 波,应取 $D + d < \frac{2}{\pi} \lambda$ 。

伴流

side flow

伴流是微波窄脉冲通过一系列的波导不

规则点时所发生的波型变换和再变换现象。



伴流的波形图

当微波脉冲通过第一个不规则点时,波的一部分功率变为其它波型,即产生杂波。因为传输脉冲和杂波的群速不同,所以它们到达第二个不规则点的时间也不同。因此,通过第二个不规则点后,杂波的一部分功率又变回到原来的传输波型,但在时间上则和原来的波型有了差别。这个跟随在原来脉冲之后的“矮”脉冲就称为伴流。

在波导传输问题中,伴流的不利作用是会引起干扰。

电磁场方程组的矢量亥姆霍兹方程

vector Helmholtz equation of the electromagnetic field

对于均匀、无耗、各向同性的线性媒质,从电磁场方程组(麦克斯韦方程组)可以导出下列形式的方程

$$\nabla^2 \vec{E} + \kappa^2 \vec{E} = 0$$

$$\kappa^2 = \omega \mu \epsilon$$

这个齐次方程就称为亥姆霍兹方程,它适用于正弦交变电磁场。式中 \vec{E} 是电场强度的复矢量。对于磁场强度的复矢量,也有同样形式的亥姆霍兹方程。

将齐次波动方程 $\nabla^2 \vec{E} - \mu \epsilon \partial^2 \vec{E} / \partial t^2 = 0$ 中的 $\partial^2 / \partial t^2$ 代以 $(j\omega)^2$, 就直接得到上列形式的亥姆霍兹方程。

亥姆霍兹方程不限于写成电场和磁场强度表示式,还可以导出矢量位和赫芝矢量的亥姆霍兹方程。

亥姆霍兹方程在电磁场理论,特别是在导波理论中,有着重要的意义。从这个方程

出发求解电磁场问题, 要比直接从麦克斯韦场方程组求解简单得多。

广义边界条件

generalized boundary condition

在微波电磁场理论中, 电磁场方程组总是和边界条件同时提出的; 场方程组规定了物理问题的一般性, 而边界条件则规定了物理问题的特殊性。场方程组加上边界条件构成了“边值问题”。

不同媒质分界面上的边界条件为: 分界面两边的切向电场和法向磁感应连续、切向磁场强度之差等于面传导电流密度、法向电位差之差等于面电荷密度。

理想导体表面上(由于场在理想导体内部为零)的边界条件为: 切向电场和法向磁感应为零, 切向磁场强度等于面传导电流密度、法向电位差等于面电荷密度。

对于非理想导体表面, 边界条件可以近似地表示为

$$\vec{E}_s = \eta_s \vec{i}_n \times \vec{H}_s$$

$$\eta_s = R_s + jX_s, \quad R_s = X_s = \sqrt{\frac{\omega\mu_1}{\sigma_1}}$$

式中, 符号右下角 s 和 n 分别代表切向和法向; R_s , X_s 和 η_s 分别为表面电阻、表面电抗和表面阻抗; μ_1 和 σ_1 分别为导体的导磁系数和导电系数。

亥姆霍兹定理

Helmholtz's theorem

任一电磁场可表示成一个位函数的梯度与一个矢量位函数的旋度之和, 这就是亥姆霍兹定理, 亦可说成任一电磁场具有纵向分量及横向分量。

本征值问题

eigen-value problem

在微波理论中, 经常遇到亥姆霍兹一类数学方程的求解问题。在给定的边界条件下, 方程中的截止波数 χ 只能取某些确定的值, 而不能取这些确定值以外的其它值。这些确

定的 χ 值称为“本征值”; 对应于每一本征值, 可以求出适合亥姆霍兹方程并满足边界条件的函数即“本征函数”, 它代表了相应的波型或简正波的场。

数学上, 上述亥姆霍兹方程加上边界条件的求解问题称为“本征值问题”。

以波导问题为例, 在一定条件下(如波导电导率很高, 没有隙缝等), 本征值是“离散的”, 它们代表有限数目的传输波型和无穷多个消失场。如果波导壁的电导率不高, 或在“开波导”中, 则不仅存在有限数目的离散谱, 还包含有一个本征值的“连续谱”。

静电格林函数

static Green's function

这里的格林函数是指静电的格林函数, 即一单位点电荷所产生的电位函数, 如单位电荷所在的空间是自由空间, 则此位间的格林函数就是场点至此点电荷的距离的倒数乘以 $1/4\pi$; 如点电荷所在的空间是一闭合或半闭合空间, 则此空间的边界上的感应电荷所产生的电位应叠加在与上面提到的距离成反比的一项上, 以得出所求的格林函数。这两项之和一般又可写成无穷级数或反常积分的形式, 以便于计算。在近代微带及带线参数的计算中, 格林函数是很重要的一个辅助函数。

格林函数并矢

Green's function dyadic

格林函数并矢 \vec{G} 是下面的并矢偏微分方程的完备解

$$\begin{aligned} \nabla \times \nabla \vec{G}(x, x') - h^2 \vec{G}(x, x') \\ = \vec{I} \delta(x - x') \end{aligned}$$

其中 $\nabla \times$ 代表旋度的运算, h 是波数即 $2\pi/\lambda$, λ 为工作波长, \vec{I} 为一单位并矢, $\vec{G}(x, x')$ 就是所求的格林函数并矢, 其作用是给出任意矢量电流分布所产生的电场

$$\vec{E}(x) = j\omega\mu_0 \int_V \vec{J}(x') \cdot \vec{G}(x, x') d^3x'$$

其中, μ_0 为电流密度分布矢量 \mathbf{j} 所在的全空间 V 的导磁系数。

电象理论

theory of image

在求解电磁场问题时, 经常需要借助于电象理论。因为点电荷在导电平面前的象是对称的负电荷, 由此即可作出电偶极子的象, 从而作出磁偶极子的象, 这样就能求解诸如波导及谐振腔这类微波元件的激发问题。一般说来, 复杂的微波结构中出现的多象构成一个无穷的序列, 故处理这个无穷序列的点源所产生的场时要进行无穷级数的运算及运用复变函数中的留数定理。

在静电问题中, 电象理论是求静电格林函数的主要方法之一。

保角变换

conformal mapping

某些解析函数能将任一单连通区域变为复平面的上半平面, 这样的变换是保角的。利用这个变换可以把二维的静电及静磁问题的复杂边界变换成直线边界, 从而把问题简化。在电动力学范围则保角变换在简化边界形状的同时, 又使电磁场所在空间的媒质变为位置的函数, 有时亦可使问题简化。

求矩法

method of moment

这是一个用来计算电磁场问题的方法, 例如天线中的电流分布是一个在积分号内出现的待求函数, 故是一个积分方程的解。利用求矩法可以用一个逐点匹配的函数集来逼近这个电流积分方程, 从而代替这个积分方程。这样, 利用求矩法即可把电磁场的值与产生这个场的电流联系起来。求矩法已用来求解波导中的不连续性问题以及相控阵天线中的辐射场与馈电波导系统中的导波场间的联系的问题。这个方法的实质是将一个积分方程的解化为一组线性方程的解, 故利用矩阵反演法即可求出数值解。

相控阵天线的微波理论

microwave theory of phased-array antenna

相控阵天线使现代雷达的功能大大提高 (如发现和跟踪多目标), 因为这种天线的主瓣可以在几微秒的时间内由一个方向转到另一个方向, 而且可以在此期间内使主瓣变宽或变窄。相控阵天线是由三个主要部分组成: 天线阵面, 相移器及馈电系统。对于大的天线, 天线阵面是作为无限大的阵面来处理。相移器现有两种形式: 铁氧体相移器及半导体二极管相移器。馈电系统是用来对和差场辐射图形提供预期的阵面上的场分布, 多采取四端口功率分配器的形式。相控阵天线的辐射场分布及馈电波导中反射系数的计算与现有的波导中不连续性问题的计算相似, 故波导理论的已有成果可以直接用于相控阵天线问题。

电磁模拟律

electromagnetic scaling law

在某一个频率上做成的微波结构可以用到另一个频率上去, 例如波导中的基片集成电路的尺寸已定, 则可将尺寸乘以一个 l_0 的因子即可将此新结构用到 $l_0 f_0$ 的新频率上去, f_0 是原来的工作频率, 这个定律叫做电磁模拟定律。运用这一定律便能在较低的频率上进行某一微波结构的试验, 这对于研制高频 (如毫米波及亚毫米波) 器件有着重要意义。如果问题涉及到有限导电率 σ , 则模拟实验中所用的导电率应为 $l_0 \sigma$ 。

衍射的几何理论

geometrical theory of diffraction

微波中许多衍射问题很难应用严格的电磁理论 (麦克斯韦方程组) 来求解。纯粹的几何光学方法虽然简单, 但不适用于处理衍射问题。所谓“衍射的几何理论”乃是几何光学的发展, 可以用它来处理衍射问题。

在这个理论中, 除了几何光学中的普通

光线外,还引入了所谓“衍射光线”。这些光线是入射电磁波(或入射光线)射到边界面的边缘、棱角和端点上所产生的类似于几何光学的反射和折射定律,可以建立若干条衍射定律,用来描述衍射光线的行为。除此以外,在这一理论中还引入了“复光线”和“虚光线”的概念。每一光线联系着一部分场;某一点上的总场是通过该点所有各种光线的场的总和。

这一理论已用来处理若干微波衍射问题,并且和实验结果相符合。

耦合波理论

coupled-mode theory

耦合波理论也称为耦合模理论,在广义的概念下也包括耦合振荡问题。

振荡和波是自然界中经常发生的、随时间或时间与空间呈连续变化的现象和过程。当不只一个振荡或不只一个波同时存在时,在这些振荡或在这些波之间通常会发生某种程度的联系。这种联系就称为振荡或波之间的耦合,而研究耦合振荡与耦合波的普遍规律的理论就称为耦合波理论。

耦合波理论广泛地用来研究不规则波导、激发问题、空腔谐振器中的耦合振荡、铁氧体中的耦合波、微波电子管以及参量电路等。

耦合波理论和热传导、弹性振动以及量子力学一样,都是建立在相同的数学方法上,即“正交函数的展开理论”。

二、波导与谐振腔

馈线

feed line

馈线的作用是把发射机发出的电磁能量送给天线或把天线接收到的微波信号送给接收机。最简单的、最常用的馈线是双线、波导和同轴线等。

对馈线的主要要求是：功率容量大、频率范围宽、驻波比小、密封性能好、天线转动对馈线系统带来的附加调制小，以及机械强度高。

图1为双导线；图2为同轴线；图3为矩形波导；图4为圆波导；图5、图6为脊形波导；图7、图8为微带线。



图1 双导线馈线



图2 同轴线馈线



图3 矩形波导馈线

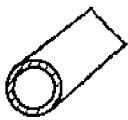


图4 圆波导馈线

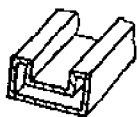


图5 脊形波导馈线

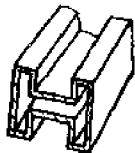


图6 脊形波导馈线



图7 微带线



图8 微带线

波导

waveguide

最普通的波导是一种空心金属管，因此波导也常常称为波导管。图(a)和图(b)示出圆形波导和矩形波导的截面图。



(a) (b)

最普通的两种波导截面

(a) 圆形波导；(b) 矩形波导。

在微波波段，由于同轴线内绝缘物的介质损耗和导线热损耗过大，效率降低，故在此波段内以波导代替同轴线来传输电磁能，它只能传输色散波，而不能传输横电磁波。

为减少传输损耗，有时在波导内壁镀上一层高电导率的金属，如金、银等。应用最广的是矩形波导和圆形波导。波导具有以下优点：(1) 没有辐射损耗，因为电磁场全部集中在波导内；(2) 介质损耗小，因为绝缘介质是空气；(3) 电阻损耗小，因为导电金属面积大，导电率高；(4) 和同样直径的同轴线比较，由于导电壁间的距离增大，能够传输较大的功率；(5) 构造简单、牢固。

在广义概念下，凡是用来引导电磁波的元件均称为波导。因此，广义的波导不仅指空金属管，同时也包括同轴电缆、介质线、微带以及各种各样特殊形式的导波结构。

矩形波导

rectangular waveguide

在波导中，最常用的是矩形波导。它传输的色散波可分为横电波 (TE或H型波) 及

横磁波 (TM 或 E 型波)。一般最常用的是 TE_{10} 波 (基模)。

圆波导

circular waveguide

圆形波导也是较常用的一种波导。它传输的是色散波, 也可分为横电波及横磁波。它的最低模式是 TE_{11} 波 (H_{11} 波)。但为了得到小的衰减, 也采用 TE_{01} 波。因为对于给定的波导尺寸, TE_{01} 波的衰减随着频率的提高而不断下降。另外, 当频率给定时, 它的衰减将随着波导尺寸的增大而下降。

弯波导

waveguide bend

弯波导的作用是改变能量传输方向。对弯波导的要求是: 反射小 (即失配小), 不降低击穿功率。

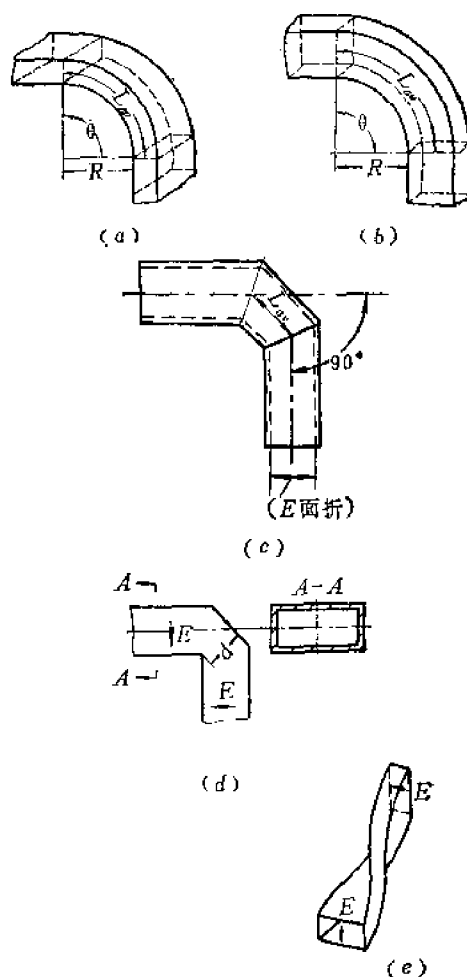
弯波导有两种: 一是 E 面弯波导如图 (a) 所示; 二是 H 面弯波导如图 (b) 所示。弯曲部分的波导特性阻抗要发生变化, 曲率半径愈小, 变化愈大。

图中, L_{av} 为弯曲部分平均长度, 等于 $\frac{1}{2}\lambda_g$ 的整数倍, λ_g 为波导波长; R 为平均曲率半径, 约等于 $5a$, a 为波导宽边; θ 为弯曲角, 等于 90° 。

和弯波导相类似的结构还有折波导和扭波导。

折波导: 可分为 E 面 90° 折波导和 H 面 90° 折波导。有双折和单折之分, 如图 (c)、(d) 所示。单折波导频带较窄, 双折波导频带较宽。当 L_{av} 约为 $\frac{1}{4}\lambda_g$ 时, 从两个连接处反射的波是反相的, 因而互相抵消。

扭波导: 用以改变极化平面方向, 其长度应等于 $\frac{1}{2}\lambda_g$ 的整数倍且不小于 $2\lambda_g$, 如图 (e) 所示。



弯波导的种类

(a) E 面弯波导; (b) H 面弯波导;
(c) E 面双折; (d) E 面单折;
(e) 90° 扭波导。

波导弯头

waveguide bend

即“弯波导”。

折波导

waveguide corner

见“弯波导”。

扭波导

twisted waveguide

见“弯波导”。

异形波导

irregular waveguide

波导结构形式种类很多, 除常见的矩形波导、方形波导、圆形波导外, 其他结构形

式的波导称为异形波导, 如三角波导、脊形波导等。

环形波导

disc waveguide

环形波导是由一系列金属环和介质环相间叠合而成。 H_{0n} 波在波导壁上只有横向环形电流, 环形波导的各圈金属环片保证 H_{0n} 波的环形电流无阻碍地流通, 即环形波导对 H_{0n} 波的表面阻抗很小, 故 H_{0n} 电波在环形波导中传输损耗较小。

非 H_{0n} 寄生波的纵向电流被介质环所阻断, 环形波导对它呈现很大的表面阻抗, 于是发生辐射致使损耗剧增。适当设计环形波导可以做到对 H_{01} 波的损耗只增加百分之几十, 而对杂波损耗增加几千倍。环形波导的缺点是加工工艺较困难, 这就限制了环形波导的广泛使用。

波纹波导

corrugated waveguide

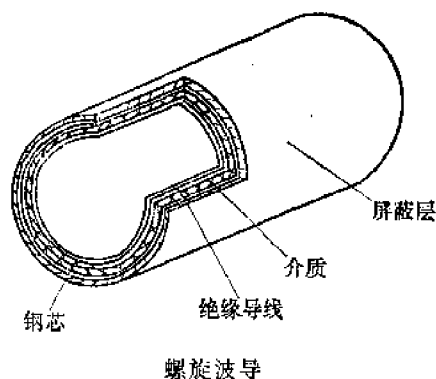
圆波导表面作成波浪式起伏的波导叫做波纹波导。这种波导的结构加长了寄生波的纵向电流的路径, 从而延缓了寄生波的相速。 H_{01} 波环形电流则是沿波纹波导的脊顶传播的, 相速改变不大。用波纹波导作弯头对于消除 E_{11}^o 和 H_{01}^o 的兼并是很有利的。波纹波导制作较困难, 且损耗较大, 不适于作通信干线的主要部分。

螺旋波导

helical waveguide

在精密钢芯上密绕绝缘导线(例如漆包线), 外面用介质加固后再覆以屏蔽层, 即可制成螺旋波导如图所示。在螺旋波导中, 由于非 H_{0n} 的寄生波的纵向电流不能直接流通, 从而大大增加了它的传输损耗。对于 H_{01} 波, 由于螺旋线匝与轴不垂直, 且每匝不是闭合的, 这将会产生附加的辐射损耗。控制螺距可以把辐射损耗控制在一定范围之内。适当地选择螺旋波导的参数(如漆包线

线径, 介质层材料等)和制造工艺, 可以做到性能良好的螺旋波导, 例如 $\phi 51$ 的螺旋波导在50千兆赫频段可以做到对 H_{01}^o 波衰耗约2分贝/公里, 而对寄生波 H_{11}^o , H_{12}^o , E_{11}^o 波衰耗分别为3分贝/米, 5分贝/米和30分贝/米。



螺旋波导

螺旋波导的滤波原理与环形波导相似, 但它易于大规模生产, 目前在波导通信系统中已获广泛采用。

介质膜波导

dielectric-coated waveguide

在圆波导管的金属内壁上涂以电介质(例如聚乙烯)薄膜作成的波导叫做介质膜波导。这类波导有显著的滤波作用。因为 H_{01}^o 波电磁场结构的特殊性, 即在被介质膜覆盖的波导壁附近, H_{01}^o 波电场很小, 而且没有径向分量, 所以, 由于介质膜的存在, H_{01}^o 波的附加衰减和相速变化都很小。而非圆对称的寄生波都有径向电场分量, 因而能被介质膜有效地吸收, 使杂模衰减大大增加。同时, 在介质中相速要减慢, 故寄生波的相位常数要增大。于是, E_{11}^o 波与 H_{01}^o 波的简并就受到破坏。正确地选择介质膜参数(即介质膜的电介常数、正切损耗值和膜厚), 即可得到良好的滤波特性。

弯角波导

corner waveguide

在波导传输线中, 由于地形的复杂性(如道路的交叉点), 要避免急转弯往往是不可能的, 因而需要使用弯角波导。在弯角波

导中, 由于反射面的存在, 使电磁波折射 90° 。弯角波导的衰耗一般为零点几分贝。常用的弯角波导有单弯角波导和双弯角波导两种。双弯角波导是由两个单弯角波导组合而成, 由于其管轴可以转动所以可使电磁波折射任意角度。

套筒式波导

telescopic waveguide

铺设在地下的波导线路往往因温度的变化而有所伸缩。在地下 1.2 米处, 一年中的温度变化达 20°C 左右, 每公里波导的伸缩约为 23 厘米。为了补偿这种伸缩, 可采用一种套筒式波导, 它主要是由滑动的双重圆波导制成, 可以拉出或压进。在相邻的弯角波导之间, 必须接入一段套筒式波导。

细径可弯波导

small diameter flexible waveguide

在波导线路的某些位置, 如采用弯角波导不适合, 则可应用一种细径可弯波导 (或称细径软波导), 其曲率半径为几十厘米到几米。管径较小可以截止部分杂模, 减少波型变换。细径可弯波导的基本结构是螺旋波导, 但不具有损耗层, 以减少由于弯曲所造成的衰减量的增加, 其最外层装有皱折式钢管以承受各种外力。

细径软波导

small diameter flexible waveguide

见“细径可弯波导”。

陶瓷波导

ceramic waveguide

用陶瓷作为介质的矩形波导或圆波导称为陶瓷波导。其结构是以陶瓷作为支架, 表

面上涂以金属而成。这种波导可用作 c 波段 ($4\sim 8$ 千兆赫) 至 Q 波段 ($26.5\sim 40$ 千兆赫) 的传输线。

脊波导

ridge waveguide

在宽带或多路传输中, 脊波导有其独特的优点。脊波导有两种截面形状。如要求工作在大功率状态, 则脊波导的工作频段可达到 2 或 3 比 1, 如果降低工作功率, 则容易做到 4 比 1 或更高的工作频段。例如, 现有的一种标准脊波导的工作频率范围是从 4700 至 11000 兆赫, 这个频段一般要求用三个标准矩形波导来覆盖。脊形波导在毫米波波段可与微带结合使用, 构成毫米波集成电路, 这时, 微带的基片安置在波导的狭窄部分, 再将固态器件安置在基片上。

与相同外尺寸的矩形波导相比, 脊形波导具有以下优点:

1. 截止波长较长, 对同一工作波长而言, 脊形波导的尺寸可缩小;
2. 等效阻抗较低, 易与低阻抗的同轴线相匹配;
3. 具有较宽的频带。

下图示出两种常见的脊波导。图 1 为双脊波导; 图 2 为单脊波导。

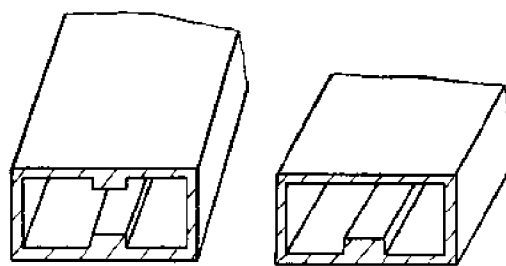


图 1 双脊波导

图 2 单脊波导

矩形软波导

rectangular flexible waveguide

矩形软波导主要在馈线系统中作“软关节”连接, 用以调节由于温度变化引起的馈线的伸缩, 对振动、转动起缓冲稳定作用, 使传输线路有一定的自由度。

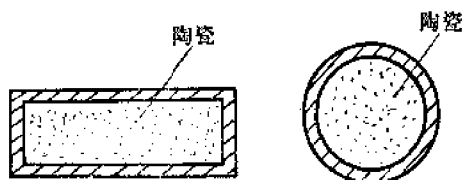


图 1 矩形陶瓷波导

图 2 圆陶瓷波导

矩形软波导可分为可扭矩形软波导和不可扭矩形软波导两类。可扭矩形软波导可以沿轴线扭转一定的角度,但传输特性不发生明显的恶化。不可扭矩形软波导则不能作扭转运动。

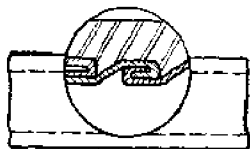
矩形软波导按其结构可以分成:1. 互锁型软波导;2. 缠绕型软波导;3. 无缝波纹型软波导;4. 焊缝型皱纹软波导;5. 脊柱型软波导等。

互锁型软波导和缠绕型软波导是可扭软波导,而其它几种为不可扭波导。

互锁型软波导

interlocked flexible waveguide

这种波导由镀银薄铜带连续螺旋绕制而成,匝与匝之间的铜带边沿相互扣合锁定,外部用橡胶作护套,两端加上适当的法兰盘,其结构如图所示。



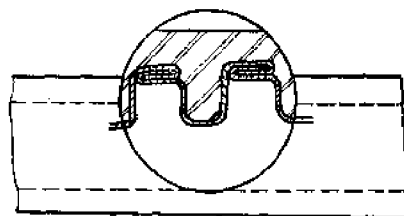
互锁型软波导结构

互锁型软波导本身不具有气密性,其气密性主要由护套来保持。这种软波导可以作一定程度的弯曲、伸缩和扭转等机械运动,但弯曲性能比缠绕型软波导差,而电压驻波特性则优于缠绕型软波导和波纹波导。

缠绕型软波导

convoluted flexible waveguide

缠绕型软波导的结构和制造方法与互锁型软波导相类似。它是用镀银铜带在波导绕制机上连续绕制而成。其结构如图所示。这种波导结构本身也不具有气密性,而是靠护套保持。缠绕型软波导具有一定的弯曲、扭转和伸缩的机械性能,其弯曲性能优于互锁型波导管,能在较大范围内弯曲,但损耗较大。

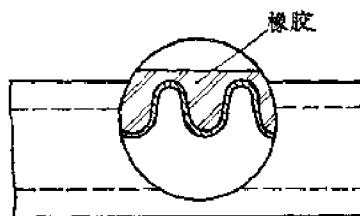


缠绕型软波导结构

无缝纹型软波导

seamless corrugated waveguide

这种波导是把管壁制造成波纹形的无缝矩形金属管,再在两端加上法兰盘构成。外部用保护漆或橡皮护套作护层。其结构如图所示。



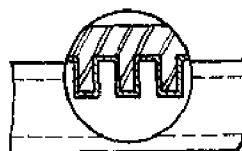
无缝波纹型软波导

这种结构的波导本身具有良好的气密性和弯曲性能,但不能扭转。其衰减特性优于互锁型缠绕型软波导。

焊缝皱纹型软波导

null point seam flexible waveguide

这种波导是由形成矩形皱纹的金属薄片卷成矩形,而后在沿一宽壁的中心迭接的接缝处进行焊接而成。这种软波导弯曲度较大,但不能扭转,波导本身具有气密性,可以充气,在传输功率和衰减性能方面与相当的光壁软波导相差无几,电压驻波比可优于1.05。



焊缝皱纹型软波导

电镀介质波导

plated dielectric waveguide

这种波导是由低损耗的硬介质基板作为传输媒质，外部镀以薄的金属层作为射频电流导体构成。

介质基板可以是密实介质或泡沫介质，但在镀覆时必须与金属有良好的粘合性能。一般采用聚苯乙烯、泡沫聚苯乙烯、交链聚乙烯等作为介质基板材料。金属镀层一般采用镀铜，也可以镀银和镍。

这种波导的优点是：1. 重量轻；2. 成本低；3. 制造方便；4. 可以节约大量的铜。

电镀介质波导的性能和普通的波导元件相当。适于作航空机载雷达和携带式微波中继通讯的馈电系统。

椭圆软波导

elliptic flexible waveguide

椭圆软波导是一种截面为椭圆形的传输电磁能量的空芯金属管。它传输的电磁波可为横电波和横磁波，一般常用的是基波 TE_{011} 波。它通常是以大长度的椭圆软波导作为天线的馈电线。椭圆软波导综合了同轴电缆的机械性能和矩形波导电气性能的特点，为制作大长度柔软微波馈线开拓了新的途径。

椭圆软波导的主要优点有：

1. 可绕在电缆盘上，便于运输；
2. 重量轻、架设简单、成本低；
3. 不需要弯波导、扭波导和中间法兰盘；
4. 易于大长度制造，长度可达几百米；
5. 气密性好；
6. 极化稳定，易于与矩形波导或同轴电缆匹配连接；

7. 在尺寸大致相同条件下，衰减和驻波比都比同轴电缆小，由于连接元件和法兰盘的减少，线路总效果可接近或超过矩形硬波导系统。

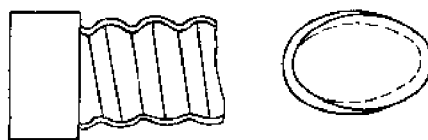
椭圆软波导可分皱纹椭圆软波导和铝椭

圆软波导两种。

皱纹椭圆软波导

corrugated elliptic waveguide

皱纹椭圆软波导的结构如下图所示，大多用铜作导体，也有采用铝作导体的。在用于机动性较大的场合，为了保持足够高的机械强度和稳定性，也可用铜包钢带作导体，护套材料则采用黑色低密度聚乙烯。其生产工艺与皱纹同轴电缆外导体的生产工艺相似，先由铜带逐步卷成铜管，经焊接、轧纹，而后经两组压轮整形成椭圆。也有采用互锁形绕制工艺的。

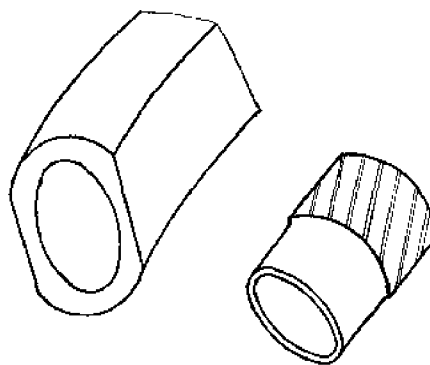


皱纹椭圆波导

铝椭圆软波导

aluminum elliptic flexible waveguide

这种波导由椭圆截面的光壁铝管构成，如下图所示。其导电材料采用导电性比较好的半软性的高纯度铝，其屈服点比较低，能够比较容易地弯曲和扭转。也有采用含铝量在99.5%以上的抗腐蚀铝合金作为导体的。护套材料大多采用黑色低密度聚乙烯。



铝椭圆软波导

螺旋圆波导

helical circular waveguide

螺旋圆波导通常称螺旋波导。其制造工

艺是在金属模芯上用细的漆包线密绕成螺旋状, 外侧用损耗介质层加固, 然后把模芯抽去。必要时在外侧加上钢管护套。这种波导由于 H_{01} 模在轴向波导壁表面没有电流, 所以和金属圆波导一样以低损耗传输; 而对于 E_{11} 及其它寄生模, 由于其轴向电流有很大的衰减, 并被损耗层吸收, 因而这种波导有自滤波作用。

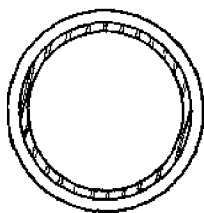
螺旋波导主要用作大容量毫米波通信线路, 也可作为无线电通信、雷达等设备的低衰减馈线。

介质膜圆波导

dielectric lined circular waveguide

这种波导在金属圆壁上涂有一层介质薄膜, 用来防止 H_{01} 模转变为不需要的 E_{11} 模。由于 H_{01} 模在波导管壁附近电场很小, 而且没有径向分量, 因此, 由介质薄膜引起的 H_{01} 模的衰减很小; 而对于圆波导中传输的 E_{11} 模和其它有电场径向分量的寄生模, 则有效地集中在介质膜中而被吸收, 因而它具有显著的自滤波作用。

这种波导主要用作长距离通信和大容量毫米波通信的传输线。



介质膜圆波导

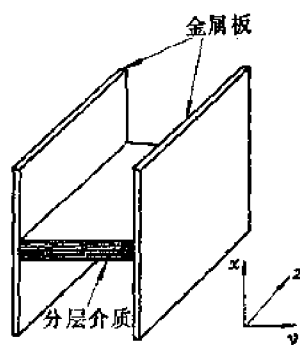
H波导

H-waveguide

H波导是一种金属-介质波导, 它是由介质片隔开的两片平行金属带所构成, 在H波导中, 场沿着介质片的表面在一个横向 z 方向上传播, 而在横向的另一方向上(y 方向), 则为金属的导体平面所限制。H波导具有 H_{01} 模圆波导的特性, 即波导的衰减随

着频率的增高而降低。波导损耗由金属的损耗和介质损耗所组成, 主要是介质损耗所引起的。为了降低衰减, 近来发展了用分层介质的结构。

这种波导主要作为毫米波传输线。

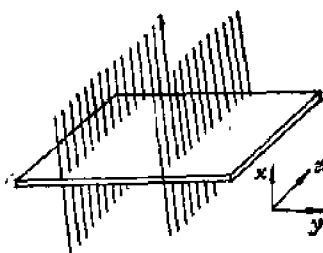


H波导

栅栏波导

fence waveguide

栅栏波导是H波导的一种变型, 由介质基片及基片上两排金属线栅构成。其工作原理与H波导基本上相同, 能量沿 z 方向传播。这种波导特别适用于毫米波电路。栅栏波导的衰减为介质基片的介质损耗、栏的金属损耗和漏泄损耗以及开放的顶部和底部的辐射损耗之和。以栅栏波导为基础可以设计出功率分配器、定向耦合器、混合环、谐振器及其它元件。



栅栏波导

开波导

open waveguide

普通类型的波导(如矩形波导、圆波导、同轴线等)是封闭的, 它们将电磁波限制在波导结构的内部。从几何形状来看, “开”波

导是一种不具有封闭金属屏蔽的结构。它的独特优点是工艺制造简单。

因为没有屏蔽,所以当电磁波沿开波导传输时,能量将分布在空间内。为了有效地引导电磁波,开波导必须将电磁波能量的主要部分限制在波导结构的周围。这就是说,开波导传输的波是一种“表面波”,即能量集中在波导表面附近的波。表面波一般具有慢波的特性。

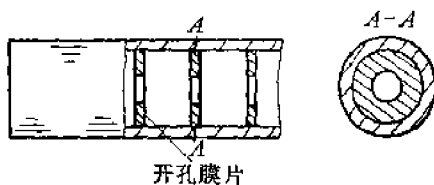
开波导不同于闭波导的另一个特点是在它们所能传输的各种表面波中,存在着一种没有低频截止值的波型。

开波导有各种不同形式,如单线波导、介质线、介质管波导、H波导等。

周期性结构

periodic structure

周期性结构是指周期性加载的波导。最简单的例子是在普通的圆波导中每隔同样距离加上一个开孔膜片,如图所示。



周期性结构

还有其它更加复杂的周期性结构,例如由一系列T型波导接头串联而成的系统。

周期性结构的最基本特点首先表现在它具有频率滤波器的特性,即它具有一系列交替的通带和阻带。

和上述特性相联系的特点是波的传播速度和频率之间的关系。在给定频率上,波不具有唯一确定的速度。由于场是周期性沿着线路变化,故可将场展开成傅里叶级数,它的不同分量具有不同速度。同样频率的较高阶分量具有较短波长,因而具有较慢速度,故周期性结构是一种慢波系统。

特种截面同轴线

coaxial line of unusual cross-section

除圆柱体双线传输,圆柱同轴线,带状线及微带线及其变型外,目前还有多种截面形状的同轴线,其中已获广泛利用的是矩形柱体与圆柱体构成的同轴线,如内外导体都是矩形的同轴线,外导体为矩形,内导体为圆柱形的同轴线。对这类同轴线虽然还没有严格的计算公式,但已有高度准确的计算方法及图表曲线。外导体为圆柱体,内导体为矩形柱体的同轴线的计算亦在进行。开槽的圆柱形同轴线;外导体为正多角形,内导体为圆柱形的同轴线;外导体为圆柱形,内导体为椭圆的同轴线的计算亦可以在手册中找到。

带状线及微带

strip line and microstrip

图1所示的传输线包含有上、下接地导体及中间的矩形导体叫做带状线,如某两边对称地加上两与上下底垂直的导体,则变成同轴矩形线。这种传输线在小型化电路元件中广泛被应用。图2的传输线是微带,是在高介电常数 k 的介质上安置宽度为 W ,厚度为 t 的导体作为传输线的一个导体,一个导体是相距为 h 的接地导体板。当所用的高介电常数的介质的损耗不大时,这种微带传输线是有效的微波元件,用在武器,空间技术,卫星通信及高速计算机中。在这两种传输线上,图1的带状线中传播的是传输线型的横电磁波,而在图2的微带中,传播的是准横电磁波。现在已有大量的计算公式及图表供利用这两种传输线作为微波元件时进行设计计算。

微带线具有体积小、重量轻、频带宽、成本低以及与固体器件的良好配合等优点。但衰减比标准波导大,功率容量也比标准波导小。

微带已广泛应用于微波波段的各种有源和无源微波器件,如功率分配器、滤波器、定

向耦合器、混频器、参量放大器、倍频器及隧道二极管放大器等。微带线的缺点是损耗较大,故品质因数低,功率容量小(只限于中、小功率应用),调节较困难等。



图1 带状线结构

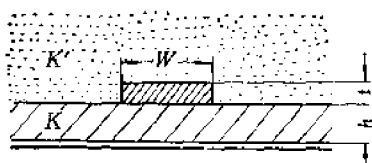


图2 微带结构

谐振腔

resonator; resonator cavity

微波工程中的谐振电路常由金属空腔组成,称为空腔谐振器,简称谐振腔。因为当频率增高时,谐振回路的集总参数电感和电容的数值太小,以致不易制造,同时由于集肤效应及辐射现象显著致使回路Q值大大降低。因此,在频率高于1000兆赫时就用谐振腔,一般在300兆赫以上用同轴腔。谐振腔既然是一个封闭的金属空腔,电磁场全部集中于腔内,而无辐射,故有较高的Q值。

谐振腔的基本概念,可以看成是由等值的感容(LC)电路所组成。在两个圆片组成的电容之间加接一圈电感,组成一个LC谐振电路如图(a)所示;加接二圈电感如图(b),则电感减低一半,频率即可以提高。如将电感的并联圈数继续增高,频率逐渐提高,最后圆片四周都被金属封闭,结果形成空腔。

谐振腔可以有任何的形状,但在实用上仅有几种简单的结构。矩形谐振腔(图d)圆柱形谐振腔(图e)及重入式谐振腔(图f)是比较常用的几种。谐振腔具有多频性,其次具有窄频性,即频率范围很窄。它的谐振

频率取决于它的几何尺寸和振荡波型。

磁控管谐振腔的多频性,影响磁控管工作的稳定性,为此常采用隔模带,增加模式分隔,以提高磁控管的工作稳定性。

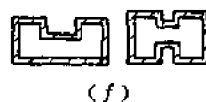
对谐振腔的电气性能的主要要求是波型单一,品质因数高,可调频率范围宽。



(a) (b) (c)



(d) (e)



(f)

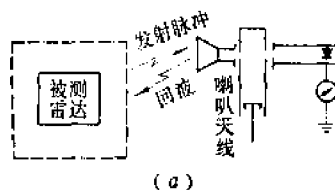
常见的谐振腔型式

回波谐振器

echo-resonator

回波谐振器(简称回波箱),是一种检查雷达(特别是舰载雷达)在实验室和野外条件下工作性能的仪表。

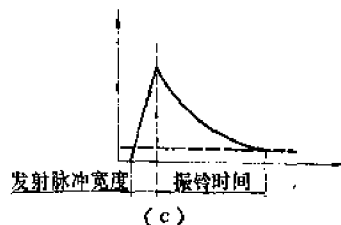
这类仪器的方框原理如图(a)所示。



(a)



(b)



(c)

回波谐振器原理图

其工作原理如下:由被测雷达天线辐射的高频脉冲,经喇叭天线,馈线耦合到谐振

腔中,此谐振腔通过短路活塞实现调谐,为了指示调谐,谐振腔又经过耦合孔,把部分高频能量送到检波器检波出的直流电流由电表指示,当谐振腔与输入高频脉冲谐振时电表指示最大。

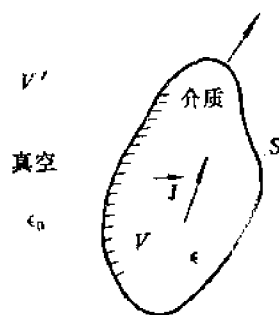
由于谐振腔的Q值高达几万,所以当谐振器调到雷达高频脉冲频率时,则被激励的电磁波在谐振器内保持一段时间,这段时间比发射机脉冲的持续时间要长,称为振铃时间(见图c),在这段时间内谐振器又经过耦合孔、喇叭天线,把激励的能量辐射出去,并被雷达天线和接收机接收,且在P型显示器上产生一个光亮半径(见图b),以及在水平扫描示波器上产生如图(c)所示的有衰减形式的脉冲。接收机灵敏度越高,发射机功率和天线增益越高,振铃时间就越长。因此,回波信号标记持续时间就表明了雷达总的工作性能。

用回波箱检查雷达的性能也可以不使用喇叭天线,而经过方向耦合器直接把回波箱接到雷达馈线上。

介质谐振器

dielectric resonator

一个非磁性高介电常数的介质物体是一个谐振器,可用做微波网络中的谐振元件,就像空腔谐振器是一个谐振元件一样,介质谐振器中的场可以是由其中的体积分布电流所激发,亦可以由外场即激发场或入射场来激发,如下图所示, S 是围出此介质体积的闭曲面, V' 是外部自由空间(真空)。此介质谐振器的振荡模是当 J 不存在时出现的电磁场。这个电磁场的解是下图的耦合空间问题的解,只有当介质物体是球体等对称形时这个解才可以严格地求出。对于常用的谐振器,已有高度准确的近似解。介质谐振器中及其附近的场在谐振频率附近取大的值,谐振的尖锐程度随介质谐振器的介电常数的增大而增加。



介质谐振器原理图

同轴线空腔谐振器

coaxial cavity resonator

利用同轴线构成的分布参数谐振回路称作同轴线谐振器。腔内通常以最低模 TEM 波振荡。一般用作微波振荡回路和波长计等。

同轴型谐振器可分三种形式:见图(a)、(b)、(c)。

(1) 同轴线一端短路,另一端开路,谐振长度 l 为四分之一波长 λ_0 的奇数倍,

$$\text{即 } l = n \cdot \frac{\lambda_0}{4} \quad n = 1, 3, 5, \dots$$

$$\text{它的空载品质因数 } Q_0 = \frac{r}{\delta} \frac{2 \ln \frac{r}{R}}{1 + \frac{r}{R}}$$

当 $\frac{r}{R} = 3.6$ 时, Q_0 具有最大值,即 $Q_{0\max} = 0.557 \frac{r}{\delta}$ 。在实际中,为避免开路端的辐射损耗,外导体做得比内导体长一些,即图(a)中的 L 部分,使延长的外导体起着过极限圆波导的作用。

(2) 同轴线两端都短路,谐振长度为二分之一波长的整数倍,即 $l = \frac{\lambda}{2} \cdot n$ 。固有品质因数

$$Q_0 = \frac{2\pi\delta}{\frac{\lambda}{R} \left(\frac{1}{r^2} + \frac{1}{R^2} \right) + 8n}$$

(3) 同轴线一端短路,另一端外导体用导体端盖闭合,该端盖和内导体之间有一定

距离, 因而形成一电容, 称电容负载谐振器, 其谐振长度比第一种短。

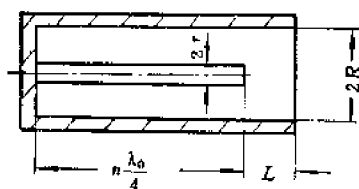
以上各式中: δ ——TEM波的穿透深度

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega_0 \mu \sigma}}$$

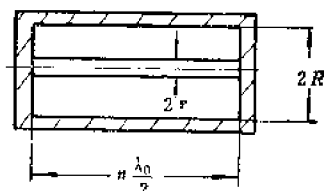
ω_0 ——谐振角频率;

μ 、 σ ——同轴线空腔中介质
导磁率, σ 为腔壁
金属的导电系数;

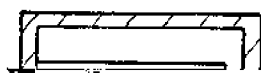
r 、 R ——同轴线内外导体半
径。



(a)



(b)



谐振腔, 电磁波在两个反射面间来回反射而形成振荡。

开放式谐振腔是由于激光器的出现而引起重视的。但是, 这种谐振腔对于微波技术也有重要意义。根据模拟原理, 可以利用微波方法来确定光谐振腔的场结构。

开放式谐振腔的振荡模可以根据惠更斯-菲涅耳原理来确定。设在谐振腔中存在着某种形状的场结构, 它从一个反射面传播到另一个反射面, 又反射回来, 而场的分布形状不变, 那么, 这种场结构就是开放式谐振腔中的一个振荡模, 或本征模。利用计算机方法可以算出各种本征模的场分布和损耗特性。

基于半无限长平行面波导和柱形波导的微波理论 (主要是函数论方法), 可以严格地求出开放式谐振腔的解析解。这种解析解和上述利用计算机得到的结果相一致。

超导腔

superconductor cavity

超导腔是指用超导材料 (如纯铌) 制成的微波谐振腔。这种谐振腔是因为高能加速器研究的需要而受到重视的。但这种具有极高 Q 值的新型腔体在微波技术的发展中可望获得更加广泛的应用。

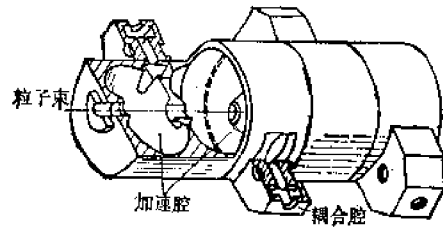
边耦合腔

side-coupled cavity

这是近年来用于质子直线加速器的一种新型谐振腔。质子直线加速器朝高能发展,在很大程度上是因为创制成了这种加速装置。

这种装置的主体由一段短的起加速作用的高频谐振腔组成(称为主腔)。相邻主腔之间通过位于加速器主体外边的另外的谐振腔

(称为边腔)耦合起来。理论和实验证明,这些边腔的效果使得整个加速结构的稳定性提高,并且使公差要求降低。



质子直线加速装置示意图

三、微波元器件与网络

微波元(器)件

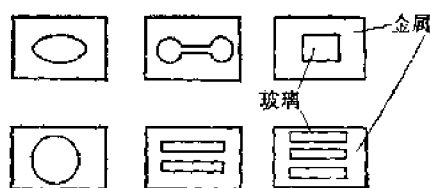
microwave component (device)

在微波系统中,实现对微波信号或能量进行定向传输、放大、衰减、分配、储存、隔离、滤波、相位控制、波型变换以及其它特殊作用的元件,统称为微波元件。由于微波技术的迅速发展,它们的种类繁多,可按波段及带宽分;按传输线形式分(如同轴式、波导式、微带式或带状线式);按外形结构分(如连接、分支、过渡等元件);按功能作用分(如功率分配、波型变换、阻抗匹配、谐振、滤波、铁磁铁电等元件)以及其它特殊元件。

密封窗

hermetic window

当波导馈线需要充气时,要求在充气部分的波导两端加隔层,使之与外界空气隔绝。隔层通常为带小窗的金属膜片,窗口用介质封闭。这种形式的隔层叫做密封窗。下图示出矩形波导中几种常见的密封窗形式。



矩形波导中几种常见的密封窗形式

在电气性能上,密封窗可以看成是感性膜片和容性膜片的复合。在某一频率范围内,电容电感发生并联谐振,使小窗对电磁波的反射最低。在谐振范围之外,小窗的电纳呈容性或感性,可以作为馈线中的匹配膜片。所以有时也称密封窗为谐振窗。

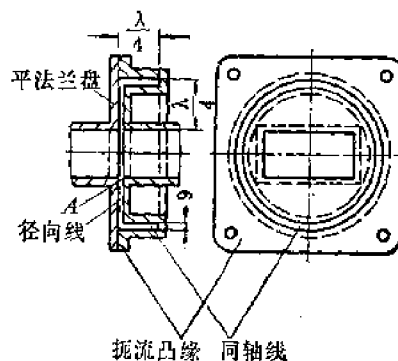
传输线扼流接头

transmission line choke

传输线扼流接头可分为波导式和同轴线式两种,两者的工作原理大致相同。现以矩形波导扼流接头为例说明如下:如图所示,在带有扼流槽的法兰盘上,具有深度为 $\lambda/4$ 的环形小槽,槽底构成一短路面,其阻抗等于零,槽与波导宽壁中点A的距离也等于 $\frac{1}{4}\lambda$ 。由此可见,从A点到槽底的距离为 $\frac{1}{2}\lambda$ 。A点的输入阻抗接近于零,即使它与平法兰盘之间有一定缝隙,电气上还是近于短路的。

扼流接头在大功率情况下,可以做到接触处无辐射损耗、无接触损耗、不打火、无显著反射,但工作频带较窄。

同轴线扼流接头的工作原理和波导式扼流接头相同,同轴线扼流接头在微波旋转关节,短路装置中应用很广,而波导扼流接头大量用于传输线之间的连接。



波导的扼流凸缘连接

矩形-圆形波导转换器

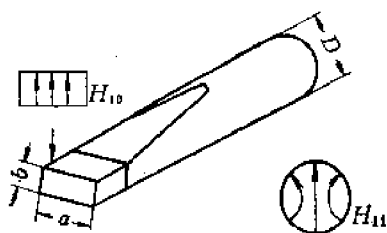
rectangular-circular waveguide transducer

矩形-圆形波导转换器在结构上转换的同时, 实现波型上的转换, 即矩形波导的基模 H_{10} 被转换为圆型波导的基模 H_{11} 或第二个高次模 E_{01} 。 H_{10} 波在微波测量仪器及微波铁氧体等器件中比较常用, E_{01} 波的场结构具有旋转对称性, 故在波导旋转关节中最常采用。现举两例说明如下:

(一) 渐变式: 如图所示, 矩-圆两部分场分布和极化方向也示于图中。只要渐变部分足够长, 即可获得较小的反射。圆波导的直径选择必须保证 H_{11} 波的传输, 而尽可能抑制 E_{01} 波。为了使反射更小, 还可加入匹配元件。

(二) 矩-圆垂直过渡: 矩-圆两波导垂直连接, 在外侧拐角处内部放一个适当尺寸的塞块以利匹配。从矩形波导输入的 H_{10} 波经拐角进入圆波导而激励出 H_{11} 和 E_{01} 波。为抑制 H_{11} 波的激励以保证传输单一的 E_{01} 波, 可通过几种途径, 例如:

1. 在圆波导内引入滤波隔板滤去 H_{11} 波;
2. 在矩-圆波导相交拐角处设置一个终端短路的圆波导分支 (又称滤波筒), 以滤除 H_{11} 波。



渐变式矩形-圆形波导转换器

同轴线-波导转换器

coaxial-waveguide transducer

将同轴线中的 TEM 波转换为矩形波导中的 TE_{10} 波的装置称为同轴线-波导转换器。

由于用途不同, 其结构可分为门钮式、

横杆式、穿式、耦合环式、探针式等。如图所示, 其中图 1 和图 2 通常应用于大功率, 其余应用于小功率。

电气性能上对转换器的主要要求是反射小, 频带宽。

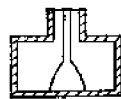


图 1 门钮式激励转换器

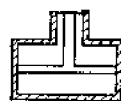


图 2 横杆激励转换器

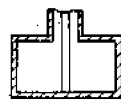


图 3 贯穿式激励转换器

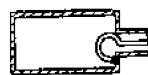


图 4 耦合环激励转换器

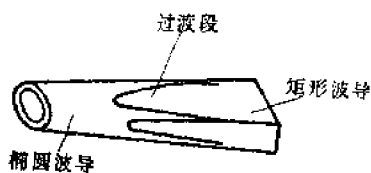


图 5 探针激励转换器

椭圆-矩形波导变换器

elliptic-rectangular waveguide transducer

椭圆-矩形波导变换器是用来使椭圆波导和矩形波导尽可能匹配地连接起来。由于椭圆波导和矩形波导传输的电磁场分布十分相似, 因此它们相互变换是比较容易的。通常使用渐变式变换器, 如下图所示。这种变换器所引起的驻波较小, 匹配频带较宽。



椭圆-矩形波导变换器

旋转关节

rotary joint; rotating joint

雷达天线要能指向空间任意方向，必须在俯仰角或方位角上采用能围绕一个轴旋转的旋转关节。对旋转关节的要求是：在旋转过程中，保证能量能正常传输，驻波比变化小，电气接触良好、损耗小、机械转动灵活、密封性好、频带宽、无击穿现象、电磁波的极化方向不变等。旋转关节按传输线类型可分为同轴线式、同轴-波导式和波导式三种。现以波导式中的一种结构（如图所示）为例加以说明。

为了保证能量的正常传输，就要使圆波导中只激励和传输轴对称的 E_{01} 波。由于圆波导中的基波是 H_{11} 波，而 E_{01} 波是 H_{11} 的邻近高次型波，所以在关节内必须设有能消除 H_{11} 波的滤波器，使得矩形波导中的 H_{10} 波只激励圆波导中的 E_{01} 波而抑制 H_{11} 波。利用 H_{11} 波和 E_{01} 波在短路圆筒中传输的相速不同，选取筒的直径 d_1 (d_1 稍小于 d_2) 应使其长度 l_1 满足下式：

$$l_1 = -\frac{3}{4} \lambda_g(H_{11}) = -\frac{1}{2} \lambda_g(E_{01})$$

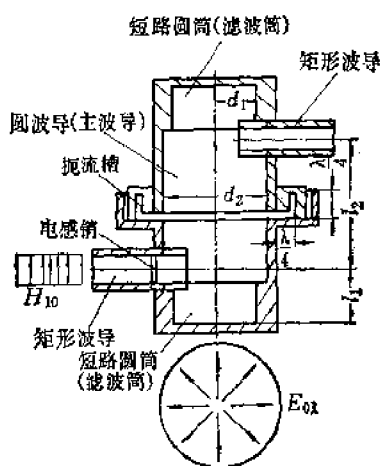
式中 $\lambda_g(H_{11})$ —— H_{11} 波的波导波长；

$\lambda_g(E_{01})$ —— E_{01} 波的波导波长。

滤波器工作于驻波状态，它串接于主线上，由于 $-\frac{3}{4} \lambda_g(H_{11})$ 短路线的输入阻抗等于无穷大，而 $-\frac{1}{2} \lambda_g(E_{01})$ 短路线的输入阻抗等于零，因而滤波器能将 H_{11} 波完全反射，而 E_{01} 波顺利通过，从而达到了上述目

的。

为了保证旋转时阻抗变化不大及避免产生 H_{11} 波，取 $l_2 = 2\lambda_g(E_{01})$ 。为了抑制与 E_{01} 波最邻近的高次波 H_{21} (截止波长 $\lambda_c(H_{21}) = 2.057 \frac{d_2}{2}$)，取 $\lambda > \lambda_c(H_{21})$ ，即 $d_2 \leq \frac{2}{2.057} \lambda$ 。考虑到矩形波导与圆波导截面的合理连接，应取 $d_2 > a$ (a 为矩形波导宽边)。



波导式旋转关节

微波衰减器

microwave attenuator

微波衰减器是用来衰减微波能量的元件，它可分为固定式和可变式两种。改变场极化面达到衰减的，有电调衰减器，回转式衰减器等。场极化面不变的有吸收式和截止式。结构上可分为波导式，同轴线式和微带式。

对衰减器的主要电气性能要求为反射小，起始衰减小，频带宽。由于精密测量的微波衰减器还要求移动平稳、精度高。

微带线衰减器

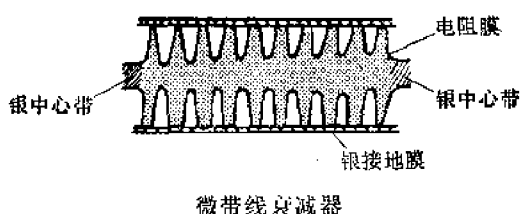
microstrip attenuator

以微带线形式构成的衰减器叫做微带线衰减器。衰减器是一个二端口器件，能使输出电平比输入电平衰减一个恒定的数值，通常以分贝表示，即

$$A = 10 \lg \frac{P_{\lambda}}{P_{\text{出}}} \text{ (分贝)}$$

微带线衰减器的特点是工作频带宽，能从直流一直到微波波段，它的精度也可作得很高，而且基本不随频率变化。

它的中心导体的一种方案如下：

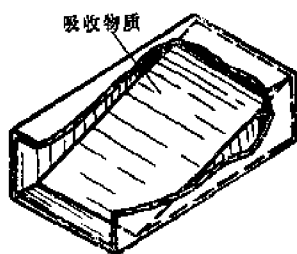


微带线衰减器广泛应用在微波宽带测量中。

波导匹配负载

waveguide match load

匹配负载（或称吸收负载）是用作高频系统的终端装置，将送来的高频功率全部吸收。匹配负载按承受的功率可分为高功率和低功率，按结构可分为波导式、同轴线式、带状线式、微带式等（前两种可分为固定式和可移式）。高功率负载又可分为水负载和干负载。匹配负载中的吸收物质要有一定长度，一般取 $2\lambda_g$ 以上，做成渐变斜面，以利匹配。低功率匹配负载吸收物质用羰基铁粉的粘合剂做成；高功率吸收物质用石墨粉和水泥的混合物或碳化硅或水做成。高功率吸收物质要有较大的散热表面以增加散热性，有时外壳上装有许多散热片。低功率带宽为 10~15%，驻波比为 1.02~1.05，高功率带宽为 10~15%，驻波比不大于 1.05~1.10。



波导匹配负载

短路活塞

short circuit plunger

短路活塞的作用是提供可以移动的短路面，在波导及同轴线设备中用来提供任意电抗值，还可作匹配元件用。其原理图如图 1 所示。结构上可分为接触式和非接触式的两种，后一种的存在是因为波导板壁内表面上流有表面电流，因而要求活塞应与波导板壁保持电气上的良好接触，以免表面电流遭受破坏。为了解决活塞移动和接触良好的矛盾，故采用扼流结构的非接触式结构，其原理和波导扼流接头类似，图 2 为接触式短路活塞的结构。

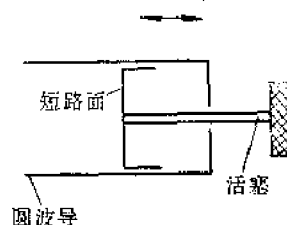


图 1 短路活塞示意图

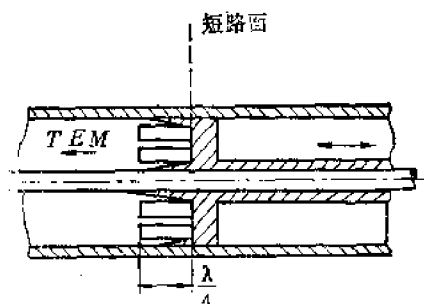


图 2 短路活塞的典型结构

对短路活塞的主要要求是电气接触良好、移动平稳。

匹配元件

matching element

利用匹配元件可以使阻抗不匹配的微波电路调整为匹配的电路。这样可以使负载获得最大功率，传输线中传输行波。匹配的元件种类很多，在波导中常用的有膜片、螺钉、E-HT 调配器等元件。在同轴线中常用的匹配元件有介质调配器、双支节（或三支节）

短路调配器等。这些匹配元件可以是电容性的,也可以是电感性的,或两者均兼有,统称电抗性的。匹配元件一般为无耗元件。

矩形波导开关

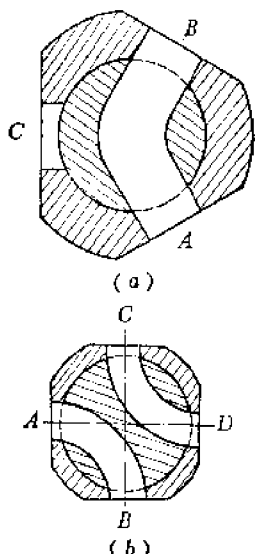
rectangular waveguide switch

矩形波导开关又称波导机械开关。有三口、四口等种,如图(a)、(b)所示。

在微波测试中,采用波导开关给测试工作带来方便。

波导开关也有E-面开关与H-面开关两种。其电气性能要求主要包括:反射系数、频带范围、最小隔离度和承受峰值功率等。

除此以外,还有同轴机械开关。



两种常用的矩形波导开关

(a) 三通波导机械开关; (b) 四通波导机械开关。

工作原理简述如下:图(a)的工作原理是,AB通,BC、CA不通;顺时针方向转 120° ,AC通,AB、BC不通;再转 120° ,CB通,BA、AC不通;再转 120° ,复原。图(b)的工作原理是,AB、DC通;转 90° ,BD、AC通;再转 90° ,复原。

铁氧体开关

ferrite switch

铁氧体开关的形式甚多,例如将一个环行器的偏磁场的方向反过来即可将其环行方向改变,故一四端口环行器通过这一方式可

以用作雷达天线主瓣开关的反向开关。

圆波导中两个相互垂直的基波信号电场可用一个 90° 的法拉弟旋转器互换位置。

铁氧体开关可以是可逆的,也可以是不可逆的。隔离比可达30~40分贝,插入损耗可做到1分贝以下,最大功率在 x 波段可达100千瓦。微波铁氧体的开关速度主要是受铁氧体所在的波导中的涡流限制,而不是由铁氧体本身限制,开关速度可达几分之一微秒。

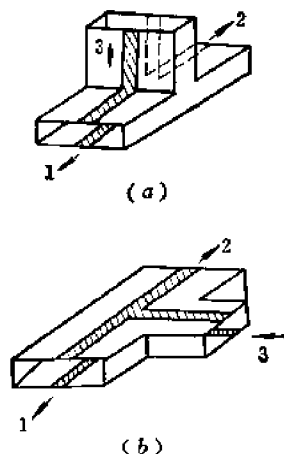
T-型接头

T-connector

一般指矩形波导T-型接头,或称为单分支T-型接头。它可分为E-T、H-T两种。E-T分支是指分支在波导宽壁上,它处在电场方向的平面内,由3臂(E臂)进入的电场平分地进入1、2臂时,电场方向相反。H-T分支是指分支在波导窄边上,它处在磁场平面内,由3臂(H臂)进入的电场,平分地进入1、2两臂时,电场方向相同。E-T接头,频带较窄。它们的共同特点是三臂不能实现完全匹配。

T-型接头在微波技术中得到广泛应用。

除矩形波导分支接头外,还有同轴线分支接头。



T-型接头

(a) E-T分支; (b) H-T分支。

双 T

double T

把 E-T 和 H-T 组合起来即构成双 T，如图 (a) 所示。它有一个对称面，从 3 臂（也称 H 臂）输入信号，在 H-T 中的场相对于对称面为偶对称分布；从 4 臂（也称 E 臂）输入信号，在 E-T 中的场为奇对称分布。

当信号由 3 臂输入时，从 1、2 等幅同相输出，不能由 4 臂输出，这是因为 3、4 臂中的电场在空间互相垂直，故 3 臂中的信号不可能建立起 4 臂中的 H_{10} 波。

当信号由 4 臂输入时，从 1、2 臂等幅反相输出，而不会由 3 臂输出，因为由 3 臂看入时，接头处的电场在对称面二侧为奇对称分布，对称面上场的平行分量为零。3 臂不可能有信号输出。故双 T 的 E、H 臂间是互相隔离的，隔离度可大于 30 分贝。

匹配双 T 也叫魔 T，为了实现匹配，可在双 T 上加匹配装置，如图 (b) (窄带匹配)、(c) (宽带匹配) 所示。魔 T 具有如下特性：

(1) 匹配性：在理想工作状态下，它的四个端口是全匹配的。

(2) 隔离性：E 和 H 臂间固有隔离，1 和 2 臂间互相隔离，即从任一臂输入信号都不能从相对的臂输出，只能从两旁臂输出。

(3) 均分性：3 臂输入等分给 1、2 臂，4 臂输入等分给 1、2 臂；1 臂输入等分给 3、4 臂；2 臂等分给 3、4 臂。

图 (c) 中圆锥体可近似看作 E 臂功率分配器如图 (d) 所示。

魔 T

magic T

即“双 T”。

折迭双 T

folded magic T

亦称变态魔 T。将标准双 T 接头中，H-T 接头的 1、2 两臂在 E 面或 H 面内折迭而成的变形双 T，分别称为 E 面折迭双 T 和 H 面折迭双 T，如图 1 和图 2 所示。

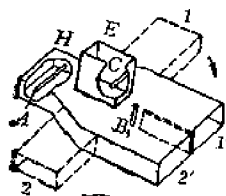


图 1 H面折迭双 T (图中 A、B、C 为匹配销)

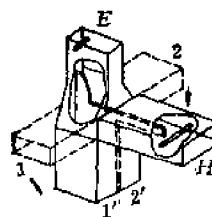
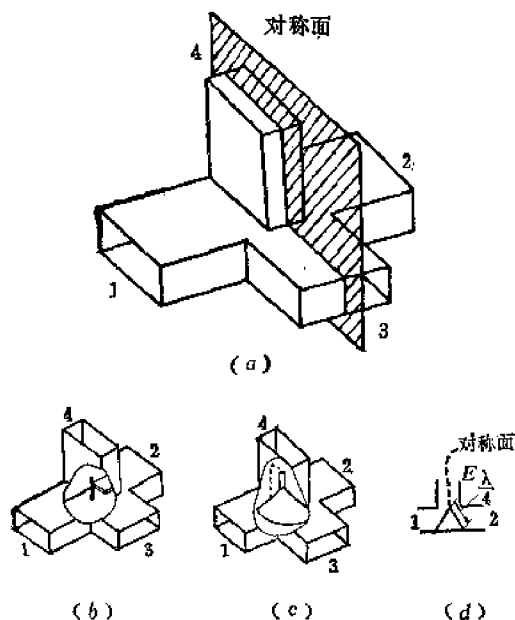


图 2 E面折迭双 T



双 T 和魔 T

(a) 双 T; (b) 窄带匹配; (c) 宽带匹配;
(d) 功率分配原理图。

折迭双 T 所占空间较小，在雷达设备中经常采用。折迭双 T 仍保持标准双 T 的一些特性，其电气要求与标准双 T 相同。

功率分配器

power divider

将一路信号分成几路信号的微波元件称

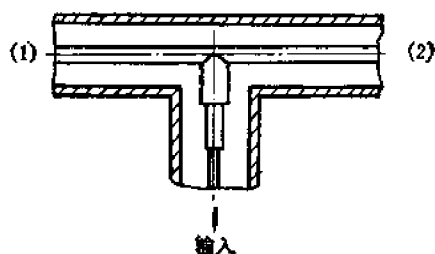
为功率分配器。在波导、同轴线、微带线中的分支接头、定向耦合器、裂缝电桥、环形电桥等都可作为功率分配器。功率分配器的种类很多，按其性能可分为：固定的、可调的、等分的、不等分的等等。

功率分配器的主要电气性能是：驻波比小、隔离度大、频带宽、功率容量大等。根据不同的用途对性能要求也有所侧重。

同轴线功率分配器

coaxial line power divider

实际中，常需将同轴线中传输的微波能量分成几路送至不同的设备（如接收、测量等），或者当输入功率很大需要分数路传输时，都需要用功率分配器。同轴线功率分配器可分为固定式和可变式两种。固定式如下图所示，它是一个并联的一分为二的同轴线功率分配器。

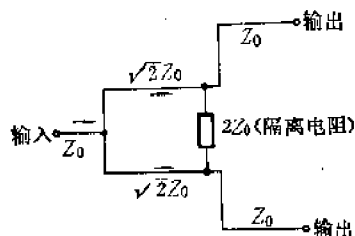


同轴线功率分配器

微带线功率分配器

microstrip power divider

以微带线形式构成的功率分配器，叫做微带线功率分配器。其原理图如下图所示。



微带线功率分配器原理图

功率分配器是将输入功率按指定的分配

比分成两路或多路输出的器件。

微带线功率分配器广泛应用于中小功率的微波馈电系统中以及微波测量中，它的工作频带可以是百分之十直到几个倍频程，输出端之间隔离较好。

三分贝隙缝电桥

three dB slot bridge

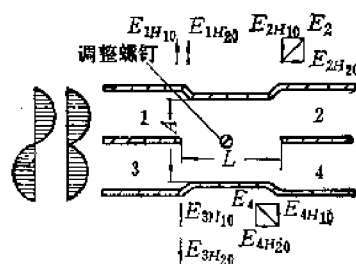
这类电桥的工作原理如下图所示。它属于短缝隙耦合电桥，由1臂输入可视为由1、3臂中各有同相和反相馈电的叠加，在隙缝段的宽波导内，同时存在 H_{10} 和 H_{20} 波，这两个波的幅度相同，但其波导波长不同，因而相速不同。若适当选择隙缝处波导宽度 A 使得在耦合段仅激励 H_{10} 和 H_{20} 波，而不激励其它高次波，并且适当选择隙缝长 L ，使经过耦合段后 H_{10} 超前于 H_{20} 波 90° ，即

$$\frac{2\pi}{\lambda_g(H_{10})} l - \frac{2\pi}{\lambda_g(H_{20})} l = \varphi = \frac{\pi}{2}$$

则此时矢量 $E_{H_{20}}$ 和 $E_{H_{10}}$ 在2臂合成的结果可以看出（见图中的矢量图），两臂输出的电场幅度相等（等分性）而相位差 90° ，即

$$A_2 = A_4$$

并且2、4臂电场在时间上是正交的。它和双T不同，双T的 E 或 H 臂输入平分给两个对称臂，其电场相位是反相或同相的。



三分贝隙缝电桥

三分贝定向耦合器

three dB directional coupler

即“三分贝隙缝电桥”。

波型变换器

wave mode transducer

简称波型器。它是用来产生多模馈源所

需高次模的微波元件。波型器的种类很多, 现举二例说明如下: (1) H面波型器: 它由激励波导 A 、 B 及主波导 C 组成, 其结构尺寸如图 1 所示。它的不连续性发生在 a 边, 即磁场平面内。激励波导内传输 H_{10} 模, 当满足条件 $\frac{3\lambda}{2} < a < 2\lambda$ 时, 在主波导内只传输 H_{10} 、 H_{20} 及 H_{30} 模, 其他高次模被截止衰减掉。

和差器与激励波导相连, 当 A 、 B 波导传输反相的 H_{10} 模时, 在主波导内激励起 H_{20} 模, 它沿 a 边场是呈奇对称的。

当 A 、 B 传输同相的 H_{10} 模时, 在主波导内激励起 H_{10} 和 H_{30} 模, 它们沿 a 边是呈偶对称的。

(2) E面波型器: 这类波型器的结构及其尺寸如图 2 所示。E面波型器的不连续性发生在波导的 b 边, 即电场平面内。激励波导内传输 H_{10} 模。当 A 、 B 同时激励时, 在主波导内产生沿 b 边呈奇对称分布的 $E_{H_{11}}$ 模; 反相激励时, 在主波导内产生呈偶对称的 H_{10} 和 $E_{H_{12}}$ 模。

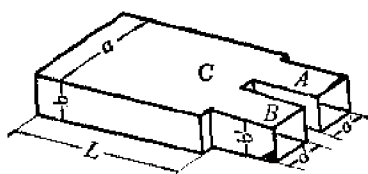


图1 H面波型变换器

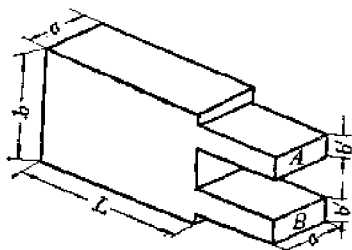


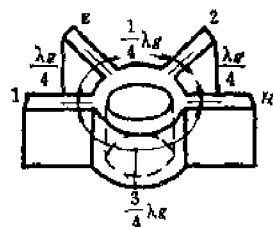
图2 E面波型变换器

波导环行桥

waveguide hybrid ring

用双T型接头不能传输大功率, 因为有

窗孔和调谐杆, 有发生击穿的危险。用波导环则可以提高传输功率, 它是在一个环形波导上, 分别接上彼此间隔的四个矩形波导构成, 如图所示。



波导环行桥

波导环行桥的工作原理与双T接头相似, 若功率从E臂输入, 输入功率将等分给两侧臂1、2而H臂无输出。若功率从H臂输入, 也等分给两侧臂1、2而E臂无输出。这种接头较双T型接头优越之处, 在于它只要选择合适的波导宽度就可以达到匹配, 而不需要安装调配元件。此外, 在结构尖角部分上也很少, 所以击穿的危险性很小, 能够传输较大的功率。在匹配良好时, E臂和H臂的隔离比可达30分贝以上。

同轴线环行桥、微带环行桥工作原理及电气要求和波导环行桥相似。

定向耦合器

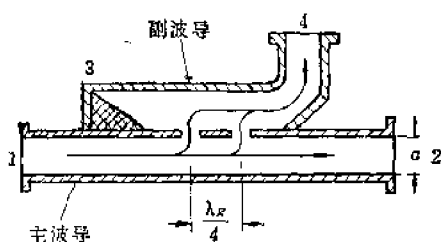
directional coupler

定向耦合器是一种微波元件, 有波导、同轴线与带状线及微带定向耦合器等多种结构型式。它们由两小段传输线所构成, 一段为主线, 另一段为副线, 主线副线之间通过耦合元(如小孔、缝隙、带状间距)把主线内的能量定向地耦合到副线的4端(如图所示), 以实现单方向耦合。

定向耦合器的主要指标有: 过渡衰减(或称耦合系数)、方向性系数、频带范围、反射特性等。按耦合系数的大小可分成不同类型的定向耦合器, 如弱耦合定向耦合器(如几十分贝), 中耦合定向耦合器(如10分贝定向耦合器), 强耦合定向耦合器(如3分贝

定向耦合器)。定向耦合器的方向性系数越高越好。定向耦合器输入端的驻波比一般要求越小越好,频带越宽越好。以波导定向耦合器为例:为实现宽频带、反射小的要求,常采用二项式或切比雪夫式多孔定向耦合器或长缝隙定向耦合器。

定向耦合器的应用范围相当广泛,如用来监测功率、频率和频谱,测馈线系统和元器件的反射系数,插入损耗,还可用作衰减器、功率分配器、谐振吸收器等。

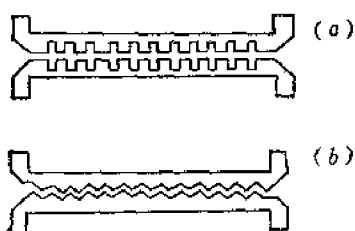


窄边双孔定向耦合器的原理结构

宽频带定向耦合器

broadband directional coupler

在微带定向耦合器中,偶模及奇模的传播速度不相同,故其方向性不高,改进的方法甚多,常用的是将两耦合线做成锯齿形的耦合段或用开槽线结构来使偶模及奇模的传播速度趋于相等,下图示出按这两种方法制造的定向耦合器形式。



宽带定向耦合器

(a) 锯齿形耦合器; (b) 开槽耦合器。

微带和带状线定向耦合器

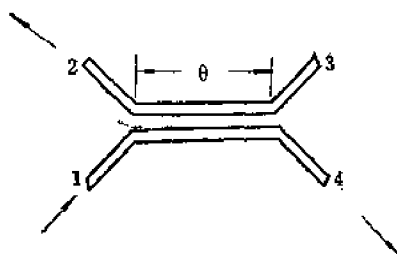
microstrip line directional coupler

这种定向耦合器是由微带和带状线构成的具有定向性耦合的微波元件。其结构形式各种各样,可分成耦合线式和分支线式两种,

耦合线式又可分成共面耦合式和宽面耦合式等。现以共面耦合式为例说明如下(其结构原理图如图所示):当信号由1端输入时,在1-4线上将产生高频电流,并在其周围空间建立起交变电磁场,此交变电磁场将1-4线上的能量耦合到2-3线。当正确选择耦合线尺寸时,耦合信号将仅由2端输出,而3端无输出。

对微带线定向耦合器提出的技术指标是耦合度(即过渡衰减)、方向性、带宽。其定义与波导定向耦合器相同。

耦合线型定向耦合器的耦合度一般为-10分贝左右,如要求耦合度大,可采用分支线型定向耦合器。



共面耦合式微带线定向耦合器

定向耦合器的过渡衰减

transit attenuation of directional coupler

定向耦合器的过渡衰减 K 定义为主线中的输入功率 P_{λ} 与副线中耦合臂(即副臂中取出能量的臂)输出功率 $P_{\#}$ 之比,通常以分贝计。

$$K = 10 \lg \frac{P_{\lambda}}{P_{\#}} \text{ (分贝)}$$

过渡衰减又叫耦合度。

定向耦合器的方向性系数

directional coefficient of directional coupler

定向耦合器的方向性系数 D 定义为副线中耦合臂输出功率 $P_{\#}$ 与隔离臂输出功率 $P_{\#}$ 之比,通常以分贝计

$$D = 10 \lg \frac{P_{\text{入}}}{P_{\text{出}}} \quad (\text{分贝})$$

阻抗变换器

impedance transformer

当两段传输线的特性阻抗不相等时, 如直接连接将造成传输系统的不匹配, 从而产生不同程度的反射。即使阻抗相同, 但尺寸不同, 由于突变的连接也要引起反射。为使馈线系统的输入驻波比最小, 就须在两段传输线之间加接一个特性阻抗逐步过渡的变换线段, 使传输线的反射达到最小, 这种过渡装置称为阻抗变换器。最简单的阻抗变换器是四分之一波长阻抗变换器。

按使用波段的不同阻抗变换器的结构可分为同轴线阻抗变换器、矩形波导阻抗变换器、带状线及微带线阻抗变换器等种。按特性阻抗变换器的规律又可分为阶段式(或称阶跃式、落差式)阻抗变换器及连续式(或称渐变式)阻抗变换器。

阶段式阻抗变换器又可分单段式、多段式、二项式、切比雪夫式等种。后两种为宽频带阻抗变换器。

连续式阻抗变换器又可分为指数式(或对数式)、极限切比雪夫式阻抗变换器。它们也归属于宽频带阻抗变换器的范畴。

相对来说, 连续式阻抗变换器较长, 加工较难, 频带利用率不高, 除了承受大功率须采用平滑过渡外, 一般不采用连续式而宁愿采用阶段式。

$\frac{\lambda}{4}$ 阻抗变换器

quarter wavelength impedance transformer

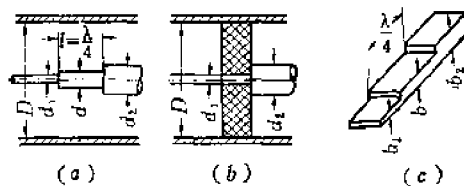
最简单的阻抗变换器是一段四分之一波长线段, 其阻抗为 $Z_{01} = \sqrt{Z_1 Z_2}$, 即选择为欲匹配的两传输线阻抗的几何中值。下图示出 $\frac{\lambda}{4}$ 阻抗变换器的三种体形式, 图(a)、(b)为同轴线, 图(c)为波导管。在图(a)中, 两

段内导体直径(d_1 、 d_2)不同的同轴线, 用一段 $\frac{\lambda}{4}$ 长, 内导体直径为 d 的同轴线使之匹配起来。

在图(b)中, 用介质垫圈使左右两段不同直径的同轴线匹配起来, 它的长度应为

$l = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}}$ 。式中 ϵ_r 为垫圈材料的介电常数。

在图(c)中, 两段尺寸(b_1 、 b_2)不同的波导用一段尺寸(b), 长为 $\frac{\lambda}{4}$ 的波导使它们匹配起来, 在结构上形成阶梯式。



三种典型的 $\frac{\lambda}{4}$ 阻抗变换器

(a)、(b) 为同轴线, (c) 为波导管。

矩形波导阻抗变换器

rectangular waveguide impedance transformer

这类阻抗变换器的工作原理及计算方法与同轴线阻抗变换器相似。由于矩形波导具有色散特性及 TE_{10} 模的等效特性阻抗

$$Z_c \propto \frac{b}{a} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}$$

等与同轴线不同, 因此波导阻抗变换器具有以下特点:

1. 因矩形波导的色散特性, 一定长度的过渡段对不同频率来说, 具有不同的电长度

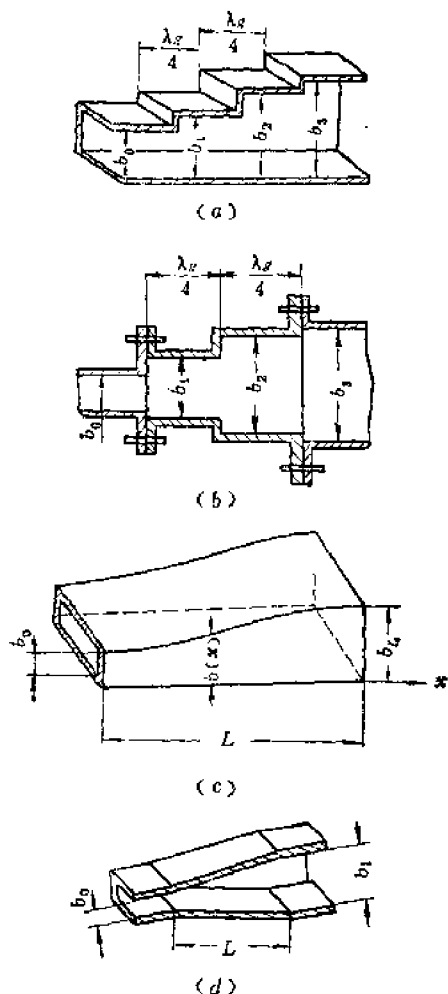
$$\left(\theta = \frac{2\pi}{\lambda_g} \cdot l, \text{ 其中 } \lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \right)。$$

因此, 矩形波导阻抗变换器的带宽比同轴线阻抗变换器的窄。

2. 因矩形波导内 TE_{10} 波的等效阻抗 $Z_c \propto \frac{b}{a} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}$, Z_c 不仅决定于

$\frac{b}{a}$ 的值, 且与频率有关。对具有不同 a 、 b 值的波导段, 它们的比值 $\frac{b}{a}$ 虽然可以相同, 但频率不同时, Z_c 值又不同。当 a 及 λ 恒定不变时, 则 Z_c 的变化仅与 b 有关。不同 b 边的矩形波导特性阻抗之比为不同的 b 边之比。所以在 a 边不变时, 矩形波导阻抗变换器, 既是尺寸变换器又是阻抗变换器。

矩形波导阻抗变换器的形式也可分为阶跃式与连续式。阶跃式一般只让 b 边阶跃变化, 如图 (a)、(b) 所示; 连续式较多采用, 仅让窄壁的上下边之一按所要求的曲线 $b(x)$ 变化, 如图 (c) 所示; 也可采用直线过渡, 让上下边对称地变化, 以减小变化的斜率而提高电性能。如图 (d) 所示。



波导阻抗变换器

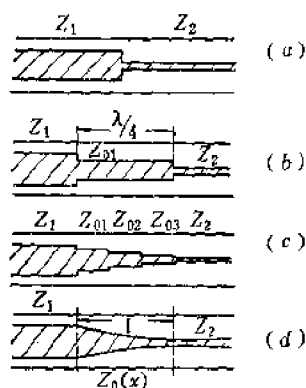
(a)、(b) 阶跃式; (c)、(d) 连续式。

微带线阻抗变换器

microstrip line impedance transformer

在如图 (a) 所示的两段特性阻抗不等的微带线之间插入一段微带线使之阻抗匹配, 这种插入的微带线段称为微带线阻抗变换器 (或称阻抗匹配段)。

最简单的阻抗变换器是一段四分之一波长线段, 其阻抗为 $Z_{01} = Z_1 Z_2$, $Z_{01} = \sqrt{Z_1 Z_2}$, 即选择为欲匹配的两微带线阻抗的几何中值, 如图 (b) 所示。



微带线阻抗变换器

(a) 微带线阻抗突变; (b) $\frac{\lambda}{4}$ 匹配段;

(c) 阶梯匹配段; (d) 渐变匹配段。

为了展宽频带, 可采用多节阶梯匹配段 (即阶梯变换器), 如图 (c) 所示。阶梯匹配段按其频率特性可做成切比雪夫式或二项式, 并分别称为切比雪夫阻抗变换器或二项式阻抗变换器; 还可以采用渐变匹配段, 如图 (d) 所示。渐变线可做成指数线式、直线式等。

同轴线阻抗变换器

coaxial transmission line impedance transducer

当两段同轴线的内外直径不同, 需要互相连接时, 有两种情况, 可能引起反射。

其一是尺寸不同, 特性阻抗相同, 即

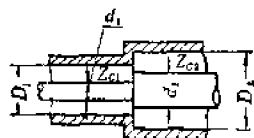
$$Z_{c1} = 60 \ln \frac{D_1}{d_1} = 60 \ln \frac{D_2}{d_2} = Z_{c2}$$

这时, 两段线连接处因尺寸发生突变, 其性

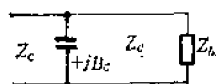
质相当于并联一个容性电纳 $+jB_c$ ，在该处激励高次模，形成电抗不连续，产生反射。如图(a)、(b)所示。

为实现阻抗相同，尺寸不同的同轴线匹配连接，在它们之间需加一个变换装置，这种具有相同特性阻抗的同轴线变换器称为尺寸变换器。它有两种形式： π 形与锥形同轴线阻抗变换器，如图(c)、(d)所示。

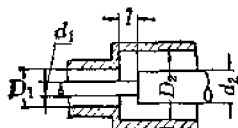
其二是两段同轴线的阻抗不同，即 $Z_{c1} \neq Z_{c2}$ ，这在连接处也会产生反射。为了实现特性阻抗不同的同轴线匹配连接，需要在它们之间加一个特性阻抗逐步变换的装置，称为同轴线阻抗变换器。同轴线阻抗变换器也还有多段阶跃式（二项式，切比雪夫式）及连续式（指数式）阻抗变换器等。



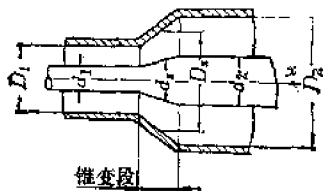
(a) 同轴线阻抗变换器



(b) 它的等效电路



(c) π 形阻抗变换器



(d) 锥形阻抗变换器

几种常见的同轴线阻抗变换器

阶梯阻抗变换器

stepped impedance transformer

这是常用的一种阻抗变换器，其中，四分之一波长阶梯阻抗变换器。

下图示出四分之一波长阶梯阻抗变换器的几种具体形式。在矩形波导和圆波导间的阶梯变换器中，除有阻抗变换作用外，还有波型变换作用，即把圆波导中的 H_{11}^c 波变为矩形波导中的 H_{10}^c 波。

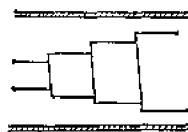


图1 同轴线阶梯阻抗变换器

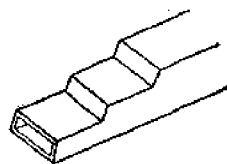


图2 矩形波导阶梯阻抗变换器

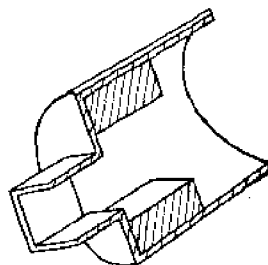


图3 矩形波导与圆波导之间的阶梯阻抗变换器

介质阻抗变换器

dielectric impedance transformer

介质阻抗变换器的作用原理与阶梯阻抗变换器相同，只不过改用了一段用高频介质（聚四氟乙烯、聚苯乙烯等）填充或部分填充的传输线作为匹配线段，该线段的长度约为填充介质后传输线中的四分之一波长。其典型结构如下图所示。



图1 同轴线介质阻抗变换器

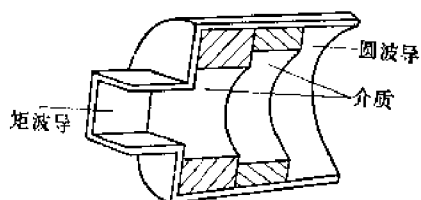


图2 圆波导矩形波导介质变换器

线性阻抗变换器

linear impedance transformer

线性阻抗变换器的作用原理与阶梯阻抗变换器相同，只不过利用了直线过渡直接把波阻抗不同的传输线段相互连接起来。其典型结构如下图所示。



图1 矩形-圆波导线性阻抗变换器

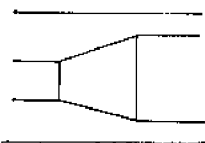


图2 同轴线阻抗变换器

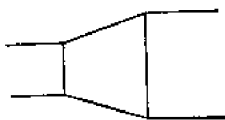


图3 圆波导阻抗变换器

微波滤波器

microwave filter

这是微波波段的频率选择元件。最简单的微波滤波器是在波导或传输线中装入一对膜片（在波导中或者用两排电感棒），这对膜片对不同的频率的反射作用不同。膜片间的

距离视波长而定。当所需的频率通过时，二个膜片的反射互相抵消，因此能使所需的频率通过。而对于其它频率，由于膜片的反射，电磁波即因衰减而被滤除去。

微波滤波器按衰减特性可分为以下四种：

1. 微波高通滤波器；
2. 微波低通滤波器；
3. 微波带通滤波器；
4. 微波带阻滤波器。

按结构可分为：

1. 波导滤波器；
2. 同轴滤波器；
3. 利用带状线中的阶跃不连续性作成的带状线滤波器等。

实际上，微波滤波器的幅-频响应曲线常用衰减表示。如图1~4所示，它表征滤波器在输入及输出端匹配时，输出功率与输入功率之比随频率而变化的情况。

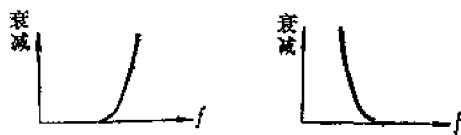


图1 低通滤波器 图2 高通滤波器

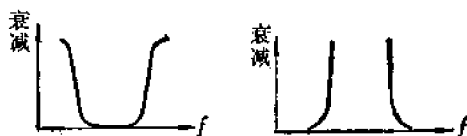


图3 带通滤波器 图4 带阻滤波器

微带滤波器的结构类型很多，有同轴型、带线型、微带型、波导型等，每种类型中的形式也有不同，最常见的几种结构如图5~8所示。



图5 同轴线端耦合滤波器

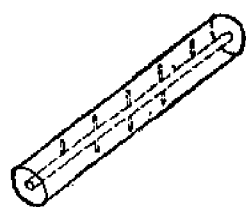


图6 同轴线感性销钉耦合滤波器

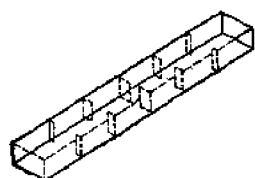


图7 波导感性开窗耦合滤波器

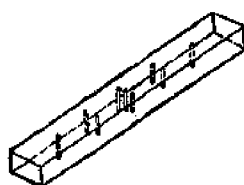
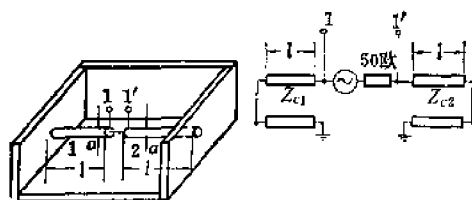


图8 波导感性销钉耦合滤波器

平衡-不平衡变换器

balun

在双平衡混频器及平衡放大器等器件中，必须用平衡-不平衡变换器来得到大小相同，但相位相反的两个电压及电流。附图所示一种典型的平衡-不平衡变换器的结构及其等效电路，这种变换器的特点是带宽很宽。当不平衡的同轴线中的驻波比预定时， Z_1 越大 (Z_1 是直径为 a 的圆棒与盒子所形成的传输线的特性阻抗) 则工作频带越宽。

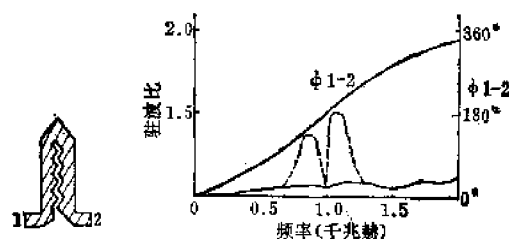


平衡-不平衡变换器的结构及其等效电路

宽带滤波器及移相器

broadband filter and phase shifters

在微带结构中，由于奇模相速与偶模相速不相等，所以微带滤波器及移相器的带宽也受到了很大的限制。补救的方法是把耦合线的耦合区做成锯齿形，下图示出一种微波C节（即微带移相器）的结构及其频率特性。图中，虚线表示未进行相速均衡时的情形，实线是加锯齿形耦合后情形。由图可见，工作频带中部驻波比曲线的突出部分这时被消除了。



微带移相器的结构及其频率特性

微波交指型结构

microwave interdigital structure

在带线或微带电路中，交指型结构的构造简单，公差要求不太严格，故制造容易、成本低。结构上，微波交指型滤波器是用 n 根耦合的带线或微带来构成一个 n 级的微波滤波器。如果嫌工作频带不宽，则应多用两根线，即用 $n+2$ 根耦合线来构成一个 n 级的微波滤波器，其外面两根线只作阻抗变换用，不构成一个谐振腔。

微波交指型定向耦合器具有频带宽，损耗小及耦合强等优点。在微带结构中，通常的结构不易提供三分贝的强耦合，但用四根或六根这样的耦合线即可构成一个良好的三分贝微带定向耦合器，其尺寸不致过大或过小。

一腔多模微波滤波器节

multi-mode cavity filter section

飞行体上所用的微波滤波器的体积和重量应尽可能地小，为此便采用在一个谐振腔内激发多个波型，再利用腔壁上的微扰元件把这些简并波型耦合起来构成一腔多模微波

滤波器节。理论分析指出,在特定的直径与高度比的条件下,圆柱谐振腔内有五个简并波型,故一个圆柱谐振腔可以成为一个五节的滤波器节,这样用两个这样的圆柱腔的串接即可得到一个十节的微波滤波器。控制这些波型间的耦合可以得最大平滑式,等波纹式及椭圆函数型的滤波特性。

最简单的一腔双模结构是圆波导及正方形的波导节。目前,利用多节这样的圆波导及正方形波导已做成椭圆函数型微波滤波器,通带中平坦延微波滤波器等。

过波型微波滤波器

over-mode microwave filter

在毫米波波带中波导滤波器的尺寸过小,损耗过大。在过波型即大尺寸波导中还应注意波型间的转换及其所引起的损耗。目前已开始采用变阻抗的传输线式滤波器,即用阶梯式的阻抗变化,这种不连续性不会引起波型转换,而且易于制造和分析设计,可制成低通,带通及带阻式微波滤波器。以低通为例,在50.8毫米的圆波导中,截止频率为73.5千兆赫,这种低通滤波器对于前十个波型提供同样的频率选择性,其中,第一个波型是 TE_{11} ,第三个波型是 TE_{01} 。

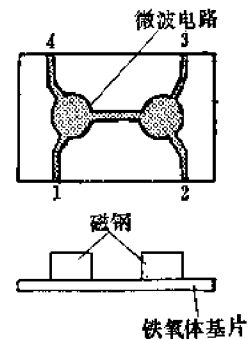
微带铁氧体四端环行器

microstrip ferrite four-port circulator

这是一种利用铁氧体的特性,用微带电路做成的四端环行器。通常是在铁氧体基片上,用微波集成电路工艺(真空蒸发、光刻、电镀等)制作电路,然后在基片背面加上磁钢,即可做成环行器。如图所示:能量从1端输入时,只有2端有能量输出,对3、4端隔离。能量从2端输入时,只有3端口有输出,对4、1端隔离。能量从3端或4端输入时,情况也与上面类似。

设计良好的微带铁氧体环流器电气性能与同轴铁氧体环流器相同。并且结构上有体积小、重量轻的特点。它是微波集成电路中

常用的器件。

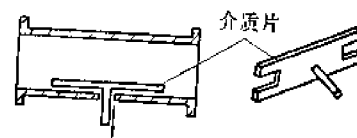


微带铁氧体四端环行器

介质片移相器

dielectric slab phase shifter

介质片移相器是一种能够改变电磁波相位常数的装置。下图示出为一种横向移动的可调介质片移相器。当介质片的介电常数一定时,由于电场沿波导宽边是按正弦分布的,所以介质片对电磁波相位常数从而对其相速的影响随其位置而变;在宽边中心处的影响最大,在两侧边时影响最小。只要改变介质片的位置,就可以在一定范围内,改变所通过的电磁波的相位。对介质片移相器的要求是相移量大、损耗小、反射小。



介质片移相器的结构示意图

微波移相器

microwave phase shifter

在微波技术中,移相器是用来改变相位的装置。在均匀传输线上任意两点间的相位差等于相移常数和两点之间距离的乘积,即

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \beta l$$

式中 β ——相位常数;

l ——长度;

φ_1 、 φ_2 ——传输线上两点的相位。

在波导管中某一区间置入一种介质或者

改变波导的宽边尺寸,都可引起相位常数的改变,从而亦引起相位变化。传输线长度变化自然也引起相位的改变,移相器即是根据这些原理制成。

此外,还可把铁氧体置于传输线中,利用其导磁率随外加直流磁场变化来产生相移。用PIN二极管作微波开关来控制传输线参量也可做成二进制数字式移相器。

模拟式铁氧体移相器

analog type ferrite shifter

模拟式铁氧体移相器有纵向磁化和闭合磁化两种,它是可逆移相器,主要应用于相控阵雷达。现以前者为例说明如下:

结构上,这类移相器是由置于矩形波导中心的纵向磁化铁氧体圆棒或方形棒及绕在波导外用作控制相移量的磁化线圈所组成,如图1所示。

它的基本工作原理是连续改变上述线圈电流的大小,使铁氧体棒导磁率发生变化,从而控制波导波长来达到连续改变相移量的目的。故称为模拟式移相器。其特点是相移量与铁氧体棒的直径有密切关系,直径过小相移量很小;直径过大,相移量虽增大(直径大于某一值后,相移量逐渐趋于一极限值),但要引起高次谐波,损耗增大。大功率运用时,晶粒尺寸减小,有利于功率容量的提高。此外,因为铁氧体棒和波导壁不接触,温度较高,需要冷却,一般均采用低损

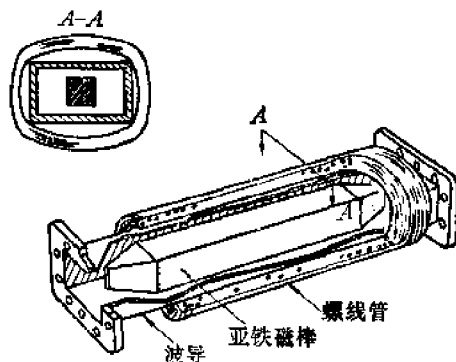


图1 方形铁氧体棒
模拟式铁氧体移相器

耗介质液体冷却,如图2所示。

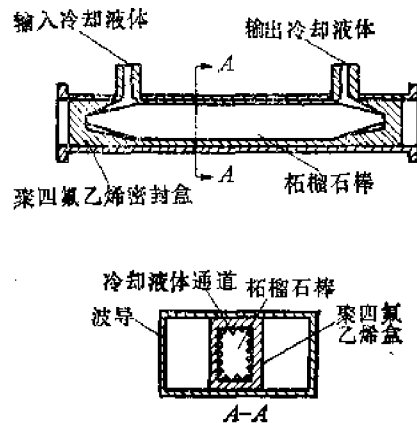


图2 低损耗介质液体冷却
模拟式铁氧体移相器

闭锁式铁氧体数字移相器

digital latching ferrite phase shifter

这类移相器的结构如图1所示。图中,四个铁氧体环块沿波导轴满高度对称放置,每个环块长度不同,横截面相同,其中心穿一根磁化线(也叫做控制线)。各环块之间的介质隔离块是用来减小各环块之间的耦合。两端的四分之一波长介质匹配块用于匹配目的。

这类移相器的工作原理如下:在图2中,由两侧及上下四块构成一个环,与波导宽边垂直的两块产生相位移,上下水平的两块用来构成闭合磁路,故称为闭锁式。如将一组幅度足够大的正负脉冲加到各对控制线上,使各环被激励到磁饱和状态;当脉冲切断后,各环依所加脉冲的极性闭锁于两个剩磁感应点 $+B_r$ 或 $-B_r$ 之一上,每个 $+B_r$ 点对应一个相移量。每个环长度不同,由短到长依次给出 22.5° , 45° , 90° , 180° 。每个环用正负脉冲表示“1”及“0”两个状态,四个环就有16组状态。每组状态对应一个相移值,如0000表示 0° ,0001表示 22.5° ,0010表示 45° ,依次类推,从 0° 到 337.5° 之间,以 22.5° 为增量依次递增,共变化16次。每组状态的数字脉冲电流由波控机提供,因此,这种相移器提供离散的

数字相移量，故称为数字式相移器。

这类相移器的损耗有两种：低功率损耗，主要由介质损耗及波导壁损耗组成；高功率损耗主要决定于自旋波的产生，所以必须抑制自旋波的激发。大功率运用必须设有致冷装置，常用的有风冷，液冷和加装散热片等。

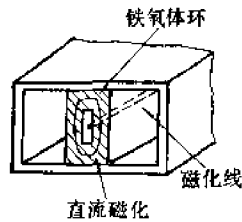


图1 四位闭锁式移相器的结构示意图

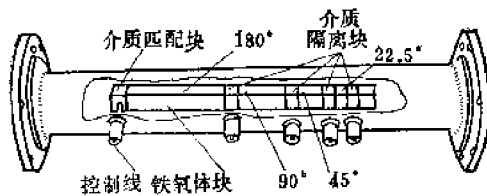


图2 工作原理示意图

双模互易铁氧体移相器

dual mode reciprocal ferrite phase shifter

这类移相器的结构示意图如图1所示。图中，极化选择器、双模极化变换器的作用是将矩形波导的线极化波 H_{10} 转换为圆极化波或将圆极化波转换为线极化波。铁氧体可变相移段是一根铁氧体棒，电磁场集中在棒内，棒上绕有线圈，通电流以控制相移量的大小。此外，还有供形成闭合磁路用的磁扼，使外加磁场更集中在棒的周围。

这类移相器的工作原理如下：矩形波导的 H_{10} 波经极化选择器、双模极化变换器转换为右旋或左旋圆极化波（此即为双模），然后进入铁氧体可变相移段（也叫法拉第旋转式移相器）以获得相移，其原理与模拟式移相器相同。最后进入双模极化器、极化选择

器将圆极化波转换为矩形波导的线极化波。这类移相器可做成数字式，也可做成模拟式的。

高功率双模移相器的结构如图2所示。高功率运用时，为获得温度稳定而需冷却，一般可用高频硅油经半导体致冷器冷却后在金属化铁氧体棒周围循环流动。

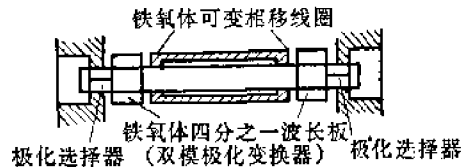


图1 双模互易铁氧体移相器的结构示意图

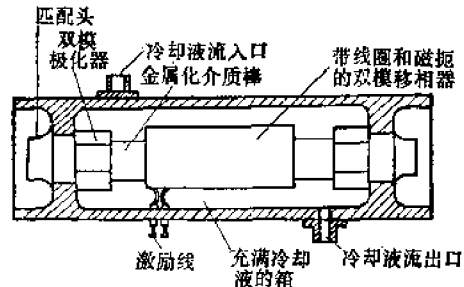


图2 高功率双模互易铁氧体移相器

波导模拟器

waveguide simulator

在近代相控阵天线的发展过程中，波导模拟器起了一定的作用。它是用来模拟一个无限大的天线阵的辐射场的一个简单波导辐射器。这样的波导模拟器的场只能是对一个扫描角及一个频率有用。如果要模拟几个扫描角，则要用适当尺寸、传播适当波型的波导辐射器。利用波导模拟器可以验证所计算的天线阵的参数是否正确，经证明无误之后才开始大天线阵的加工，这样就可以避免由于盲目加工而造成的浪费。例如，测量波导模拟器中的反射系数的值，将这些实验值与天线阵理论计算得到的值相比较，即可验证理论是否准确。

表面声波器件

surface acoustic wave device

正如水面上的波的传播一样, 固体表面的表面声波亦能传播。利用这样的表面声波做成的器件日益得到应用, 这些器件的特点是: (1) 它们是表面结构, 故适宜于用光刻技术来制造; (2) 由于声波传播速度比之电磁波的传播速度小得多, 故信号沿其传播方向在空间被压缩大约 10^5 倍; (3) 由于声波信号是在表面上传播, 故可在其传播途中取出; (4) 表面声波是稳定的, 在某些固体的表面上传播时, 温度变化对其传播的影响不大。这些器件可用作延迟线, 存储器, 振荡器, 频率滤波器, 匹配滤波器, 符号发生器, 鉴别器等。在 $10 \sim 1000$ 兆赫的频段中, 可做成带宽为 100 千赫至 300 兆赫的带通滤波器, 其结构简单、结实、体积小, 可做成集成电路。

微波晶体管功率放大器

microwave transistor power amplifier

微波晶体管功率放大器的应用越来越广泛, 其设计制造亦越来越完善, 功率放大器是属于大功率工作状态, 故首先要求能对微波晶体三极管的散射参数进行大功率的测量。然后, 根据这些参数来定出一个功率放大器的最佳工作状态, 而且保证稳定的工作。在近代的功率放大器的设计中, 不要求输出端的阻抗匹配, 而只要求输入端匹配。如果功率增益及功率输出是预定的, 则存在着两个负载阻抗的解, 以保证输入端的阻抗匹配。

微波晶体管振荡器

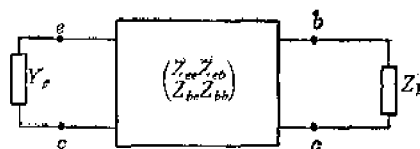
microwave transistor oscillator

微波晶体三极管的放大作用可以用来产生自激振荡。如下图所示, 设一共集电极微波晶体管的负载阻抗为 Z_L , 其发射极端的导纳为 Y_e , 则振荡条件为

$$\frac{1}{Y_e} + Z_{ee} - \frac{Z_{eb}Z_{be}}{Z_{bb} + Z_L} = 0$$

其中, Z_{ee} 及 Z_{bb} 分别为晶体管发射极及基极

端的开路阻抗, Z_{ee} 及 Z_{bb} 则为发射极端至基极端及基极端至发射极端的转移阻抗。上式表示 Y_e 与 Z_L 间的对应关系。 Z_{ee} , Z_{bb} , Z_{eb} , Z_{be} 的值可以测量出来, 它们与晶体管的散射参数 S_{11} , S_{22} , S_{12} 及 S_{21} 间存在着确定的关系。 Y_e 可以是 YIG 小球的输入导纳或其他谐振器的输入导纳。



等效四端网络

上变频器

up-converter

通常是混频器将两个输入频率的差频作为输出频率, 所以混频器又叫做下变频器。上变频器就是将两个频率不同的信号加到一个混频器上, 而将其和频信号作为输出的装置。在现代通信设备中, 下变频器用于接收支路而上变频器则用于发送支路。上变频器多采用平衡混频器或双平衡混频器, 后者又可以是四个二极管接成环结构或接成星形结构的形式。上变频器通常是大功率的, 故其效率不能低, 设计要求较高。

微波低噪声参量放大器

microwave low-noise parametric amplifier

雷达及人造地球卫星通信系统中的地面站设备, 除低温参量放大器外, 需要有常温的微波参量放大器。质量高的变容二极管及高泵频就能保证在常温工作情况下的低噪声性能。所用的多个微波滤波器的性能要好, 空间电路要设计成宽频带电路。

谐波泵源带线变频器

harmonical pumped frequency converter

在毫米波频段, 大功率发生器不易制造, 故这一装置可使上变频及下变频器中起频率

变换作用的是泵振频率的二次或四次谐波。这种谐波泵源变频器用两只相互反接的二极管,故无直流分量存在,不需要有直流回路。在这个结构中信号输入与本振输入间的隔离自然存在,信号通路中的损耗不大。噪声系数亦不大。这类变频器采用波导中的带线结构,而不用波导中的微带结构来提高技术指标。

边导模器件

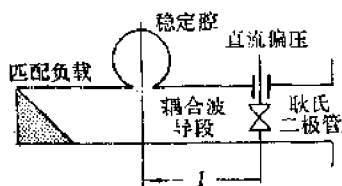
edge-guide mode device

在用铁氧体作基片的微带中出现有边导模的传播,外加恒磁场是垂直于接地导体。利用这一不可逆的传播理论可制成隔离器,多端口环行器及移相器,其中,有一种边导模隔离器,其导线的一边接地,两端有过渡段,在5~7千兆赫波段中隔离大于60分贝,插入损耗小于1分贝,带宽1~2千兆赫且结构简单,易于制造。

耿氏体效应二极管振荡器

Gunn diode oscillator

作为变频器的本振应有高的频率稳定性,否则便会发生跳模现象。耿氏二极管振荡器即能提供这些优点,下图是这类振荡器的一种结构形式,它是由矩形波导的耿氏二极管管座及稳频用的高Q谐振腔及匹配负载组成。



耿氏体效应二极管振荡器的结构

多模(微波)网络

multiple-mode(microwave) network

多模网络是指在网络中可能传输的波型除基波外还有若干个高阶波型的一种微波网络。

与单模网络不同,对于多模网络来说,一个波导分支不是仅仅相当于一个端口,而是相当于许多个端口(端口数等于传输波或非消失波的数目)。

用于单模网络的散射矩阵(S矩阵),在多模网络问题中仍然很有用。由于端口数目多,以及在多个波型间可能发生波型转换,所以多模网络的分析很复杂。因而有必要作出一些近似假定,例如,只考虑起主要作用的少数几个波型,在某些情况下忽略反方向传输波型之间的耦合等。

毫米波集成电路

millimeter integrated circuit

在3千兆赫以下的频段中,集成电路的优点是尺寸小、重量轻、成本低、电气性能良好及生产一致可靠。在毫米波段,后两个优点不易实现,这是因为在毫米波段所用的小尺寸的严格公差不易实现。在毫米波段,微带辐射损耗,多余的耦合,色散及高次模的传播等现象不容忽视。故在制造大型毫米波集成电路时要求加装“高阶波抑制器”,

“封装盒谐振吸收器”,还要用越来越薄的介质基片以减小辐射效应。在毫米波集成电路中应尽可能避免直接采用微带,因为微带与波导的转换装置不如微带与同轴线的转换装置简单,但在毫米波段同轴线的应用已变得不切实际。因此,在现代毫米波集成电路中,可用脊峰形矩形波导,介质基片跨接于矩形波导的脊与底之间等特殊装置,这类适用于毫米波集成电路的特殊装置正日益受到重视。

微波混频器网络

microwave mixer network

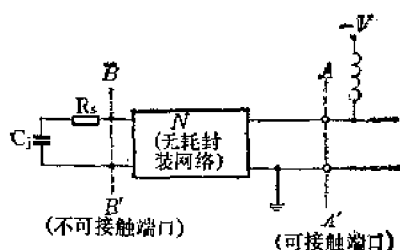
近代微波混频器中,为了得到低噪声系数,除了镜频以外,还需考虑其它空间频率,如和频率(即信号频率与本振频率之和)及其它谐波频率,这些频率的电流应流入纯电抗性与频率无关的负载,故需要在一个混频

器的输入端口即信号频率端口及输出频率端口分别接入和频滤波器及信号通过一镜频截止微波滤波器及其它谐波频率的滤波器,目前,已采用了对泵频(即本振频率)的三次谐波的滤波器。这样的装置可称为微波混频网络。

半导体器件的封装网络

semiconductor junction device package network

半导体器件需要封装才能安装及处理储存散热,这些封装设备起着—个阻抗变换作用,把半导体器的固有频率变换成另一种特性。下图示出半导体器件的等效电路,作为偏压 V 的函数的串联电阻 $R_s(V)$ 及结电容 $C_j(V)$ 被封装网络 N 接至外传输线(特性阻抗为 Z_0 ,传输常数为 β)。半导体器件的可接触点为 AA' ,其左端的输入阻抗是外电路传输所见到的阻抗,并决定了该半导体器件的性能。



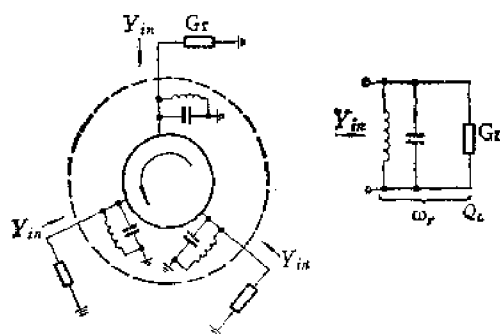
半导体器件的封装网络

环行器网络

circulator network

一个环行器网络可以认为是一个理想环行器及其各个端口上所并接的谐振电路所构成的一个线性电路。如下图所示,这样的—个网络极好地逼近真实的环行器。可以针对环行器网络来设计外电路及改善环行器的性能。例如提高其温度稳定性。下图 ω_r 是谐振频率,它与所用的铁氧体圆盘的直径和它的有效导磁率及介电常数有关。 Q_L 是有载品质因数,它与所用的铁氧体的张量导磁率

中的两个主要分量之比有关。此环行器的输入导纳 Y_{in} 等于 G_L , G_L 与铁氧体圆盘的高度及有载品质因数 Q 成反比,与截面积及谐振频率 ω_r 成正比。

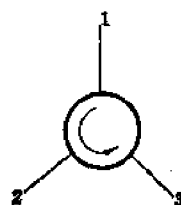


环行器网络示意图

微波铁氧体环行器

microwave ferrite circulator

微波铁氧体环行器(也叫微波铁氧体环流器)是一种运用铁氧体材料的旋磁特性所制成的多端非互易器件。现以典型的三端环行器为例(如图所示)加以说明。



三端环行器

从1臂输入的信号只能传到2臂;从2臂输入的信号只能传到3臂;从3臂输入的信号只能传到1臂。这样就达到了环行作用。多端环行器可依此类推。环行器的主要电气参数是:传输臂(如1、2)间的损耗(也称插入损耗),通常要求小于0.5分贝,对微波通信应小于0.1~0.2分贝;隔离臂(如1、3)间的衰耗(也称隔离度),通常要求大于20分贝,对微波通信应大于25~30分贝;以及各臂的输入驻波比(通常小于1.25,对微波通信应小于1.05)。

微波铁氧体环流器

microwave ferrite circulator

即“微波铁氧体环行器”。

波导环行器

waveguide junction circulator

在一个三端或四端波导接头的对称轴线上, 放置柱状或片状铁氧体, 再在波导外垂直于波导壁加上一定的恒定磁场, 当微波信号通过时, 就可能实现环行作用。除H面波导环行器外, 也可做成E面环行器。

二极管波导开关

diode waveguide switch

二极管波导开关是在一段矩形波导两宽边中线之间跨接一个或几个(相隔 $\frac{\lambda_g}{4}$ 或 $\frac{\lambda_g}{4}$ 的奇数倍)开关二极管(PIN二极管)构成。如图1所示, 当二极管加上正偏压, 则呈现低电阻, 波导呈短路状态, 微波信号通不过。加负偏压时, 二极管呈高电抗, 波导呈开路状态, 微波信号通过。这样的波导开关叫做并联二极管波导开关。此外, 尚有串联二极管波导开关。其中一种结构的示意图如图2所示。在这种情况下, 当二极管加上正偏压时, 微波信号被阻隔, 加上负偏压时, 微波信号通过。

在微波信号 S_λ 功率不变时, 波导开关在通过与切断两种状态下, 输出信号 $S_{出}$ 的功率比, 称为开关比。对波导开关而言, 开关比越大, 插入损耗越小, 输入电压驻波比越小, 其性能越好。

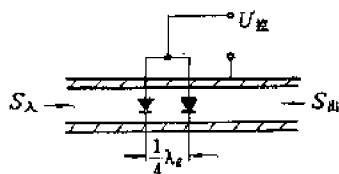


图1 并联二极管波导开关

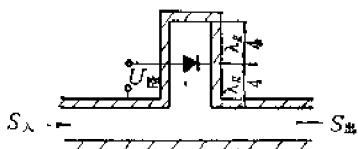


图2 串联二极管波导开关

微波延时均衡器

microwave delay equalizer

用于补偿微波滤波器的时延失真, 以保证微波中继通信的质量(微波中继通信要求延时失真小于1毫微秒以下)。具体方法是: 把微波滤波器延时最小的那部分信号的传输速度变慢, 以便另一部分延时较大的信号能“赶上”。

最简单的微波延时均衡器是由一个位于矩形波导宽壁上的圆柱形谐振腔构成。圆柱的轴和矩形波导的中心线成直角, 但偏离中心线一个距离, 以便和宽壁恰好正交到矩形波导的磁场是圆极化的地方。

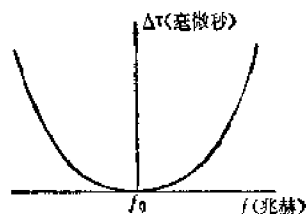


图1 微波带通滤波器延时特性

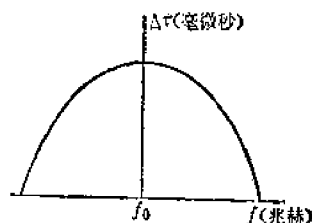


图2 微波延时均衡器延时特性

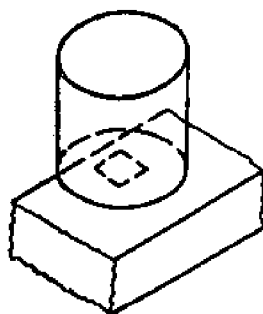


图3 延时均衡器结构图

耦合孔从矩形波导里分出一部分信号进入圆柱腔。在腔内以圆极化波传播到封闭的终端, 然后被全部反射回耦合孔, 又重新进入矩形波导, 并和直接传来的信号相加。耦

合孔与圆柱腔构成了较大的延时(而此正是滤波的延时较小的那部分信号)。同时,谐振还产生了一个延时频率特性,这个特性正好补偿通常所用微波滤波器的延时,如图所示。

图3是延时均衡器结构示意图。

群分波器

band-splitting filter

在微波中继通信中,为节省天线和馈线,常在一条馈线中同时传输几个频段的不同极化的信号,如同时传输4、6、11千兆赫三个频段的6个极化波。为了在馈线的末端分离不同频段、不同极化的信号,或将不同频段、不同极化的信号馈送至一条馈线,都需使用群分波器。按照分离频段的先后次序,群分波器可分为高顺位群分波器(即先分出11千兆赫信号,再分出6千兆赫信号,最后分出4千兆赫信号)和低顺位群分波器(分离顺序与高顺位相反)。群分波器的基本

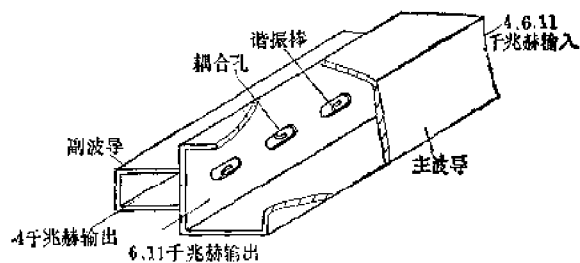


图1 低顺位群分波器

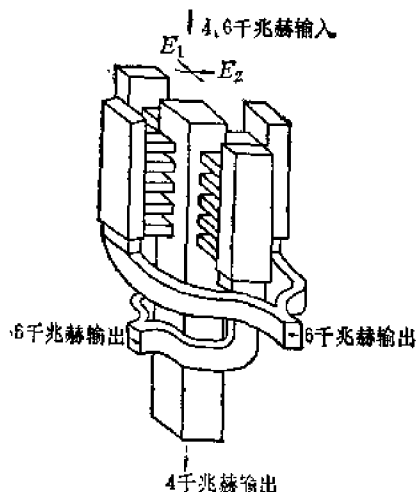


图2 高顺位群分波器

指标有:对所要分离的整个频段中的耦合损耗、对非耦合频段信号的隔离驻波比、极化去耦、该器件所激励的高次模。结构上,为获得宽频带特性,一般均采用定向耦合器型,其中又可分为纵向磁场耦合和横向磁场耦合两类。

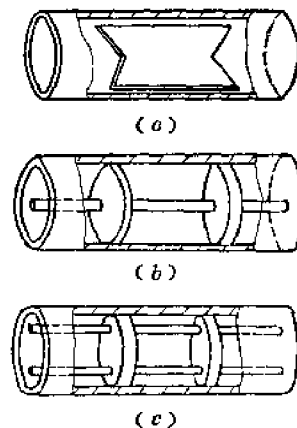
低顺位的群分波器的结构示意图1;高顺位的群分波器的结构示意图2。

高次模滤除器

high order mode filter

在波导中,有时除主波外还能传输若干高次波型,如在微波中继通信中利用圆波导的 H_{11}^o 为主波,常出现的高次波型有 E_{01}^o 、 H_{21}^o 、 E_{21}^o 、 H_{01}^o 、 H_{31}^o 等,为了消除它们常常使用高次模滤除器,亦称杂模滤除器。高次模滤除器的基本指标是:对所要滤除的波型的衰减、对主波的衰减、驻波比。它的基本原理是利用高次波型与主波场型结构的不同,在波导中插入喷有镍铬合金的玻璃棒(片),用以吸收不需要的波型,或是在波导壁上开一系列耦合孔,使之只对不需要波型发生耦合,而对主波的扰动很小,由此达到滤波的目的。

例如,在以 H_{11}^o 为主波的情况下,滤除另一极化的 H_{11}^o 波(简并波)和 E_{01}^o 波的滤除器应有如下的形式。



几种常见的高次模滤除器

(a) H_{11}^o 波滤除器; (b) E_{01}^o 波滤除器;
(c) E_{11}^o 波滤除器。

杂模滤波器

high order mode filter

见“高次模滤除器”。

铁氧体隔离器

ferrite isolator

即“铁氧体单向器”。

铁氧体单向器

ferrite isolator

这是一种非互易的两端器件，又叫铁氧体隔离器。它只容许电磁波单向通过，而对反方向传输过来的电磁波则产生很大的衰减。其典型用途就是使振荡器与负载相隔离。主要指标是：正向衰减（一般不超过0.5~1分贝），反向隔离（一般大于20~30分贝）以及正、反向的电压驻波比（一般不大于1.10~1.25）。

场移式单向器

field-displacement isolator

当矩形波导中部分填充横向磁化的铁氧体时，就会使波导中的场分布发生变化。而且，对不同传输方向的电磁波，所产生的场移是不同的。如果在铁氧体片一侧加一层吸收材料，则对正向传输的电磁波衰减很小（吸收材料所在处的电场很弱）。而对反向传输的电磁波衰减很大，利用这个原理构成的单向器叫做场移式单向器。这种单向器广泛用于通信设备、仪表及测试系统等场合（传输功率较小）。

法拉第旋转式单向器

Faraday rotation isolator

这类单向器的工作原理与法拉第旋转式环形器一样。只要把其中2、3两臂都接上匹配负载，则1与4臂就成了单向器。

铁氧体限幅器

ferrite limiter

当微波功率超过某一由铁氧体材料本身所规定的阈值时，铁氧体内将出现铁磁共振的高功率效应。其表现为共振吸收非线性地

增加，而且在主共振吸收峰外，还有一个副共振吸收峰出现在低场处。铁氧体限幅器运用这个现象，在波导或谐振腔中适当安置铁氧体和外加磁场，就可将过大的输入功率吸收掉，而保持输出功率变化很小，达到限幅的效果。

铁氧体反射式开关

ferrite reflective switch

运用铁氧体参数随外加磁场变化的特性，可以做成各种类型的微波开关。例如一种简单的反射式开关就可用一根置于矩形波导内的铁氧体圆柱来实现。当外加磁场变化时，其阻抗可在匹配到全反射之间连续变化。改变外加磁场，就可实现微波开关。这类开关的共同缺点是要消耗较大的驱动功率及时间常数较大。

磁调滤波器

magnetic tuned filter

通常的微波滤波器是由多个谐振腔所组成。利用铁氧体材料如钇铁石榴石（YIG）作成磁调谐振腔就可组成磁调滤波器。磁场的调谐往往用改变电流的方法来实现，因此也叫电调滤波器，这是旋磁滤波器的一种形式。它具有体积小、可调等优点，适于集成化。

微波固体振荡器

microwave solid-state oscillator

产生微波信号的振荡器除用速调管等热离子器件外，还使用微波固体器件如微波晶体三极管，碰撞雪崩渡越时间二极管，体效应二极管（耿氏二极管），限累二极管（限制空间电荷积累二极管）等。使用这些固体器件做成微波固体振荡器可以使重量大大减轻，体积减小，可靠性提高，避免高损耗，而且开机不需要预热时间。

体效应振荡器

Gunn oscillator

采用体效应二极管作成的振荡器叫做体

效应振荡器，也叫耿氏振荡器。

体效应振荡器的优点是噪声低，要求的工作电压低，工作频带宽，结构简单。缺点是输出功率小、效率低，目前主要用作微波接收机本振、参放泵源、小功率发射源等。

耿氏振荡器

Gunn oscillator

见“体效应振荡器”。

腔控振荡器

cavity controlled oscillator

微波频率的振荡器，一般都采用腔体

(同轴腔或空腔)作为振荡器的谐振回路或谐振回路的一部分，使振荡器的频率和频率稳定度主要取决于腔体，这种振荡器叫做腔控振荡器。

利用“频率牵引”现象，外接一个频率高度稳定的，品质因数远大于振荡回路的谐振腔(它的固有频率与振荡器频率很接近)，以产生频率牵引，使振荡器的频率固定在外谐振腔的频率上，从而大大提高振荡器的频率稳定度。这种振荡器是腔控振荡器中最典型的一种。

四、微波应用

遥感技术

remote sensing technique

在远离被测目标处,用各种技术设备(仪器)不与被测目标接触就能测定目标的位置和性质,这种技术手段就是遥感技术。从广义上来说,一切非接触的检测和识别技术都属于遥感技术的范畴。

例如,把光学照相机、红外扫描仪或微波辐射计、合成孔径侧视雷达等安装在飞机上或人造卫星上,用来普查地球资源,或测绘地形地物,或检测大气污染情况,或侦察军事目标等等,这些都是对地球环境的遥感技术。

遥感技术主要包括三个方面:一是对各种物质的光谱(波谱)特性的测试研究。这是遥感技术的物理基础。二是遥感仪器的研制,这是遥感技术的核心。按电磁波的波段划分,目前最重要的遥感仪器是:可见光波段的传感器(如远摄镜头光学照相机,可变焦距电视摄像机等),红外传感器(如红外扫描仪,多谱扫描仪等)和微波传感器(如合成孔径侧视雷达,微波辐射计等)。此外,还有紫外波段的传感器和 γ 射线传感器等。三是遥感数据的处理,包括各个波段所形成的图象的判读,识别和利用。这是应用遥感技术获得的最终结果。

微波遥感技术

microwave remote sensing technique

这是指微波波段的遥感技术,即根据各种物质的微波波谱特性,用微波遥感仪器,对远距离目标进行非接触的检测、成象和识别。

和光学照相机及红外遥感技术相比,微

波遥感技术的优点是,它可以不分白天和黑夜,不怕厚云层或人为掩体的阻挡。当光学和红外等遥感手段不能使用时,它仍能对远距离目标进行遥感。这种全天候性的特点对提高探测效率,完成军事侦察任务有重大意义,因而日益受到人们的重视。

由于微波的波长比可见光或红外线的要长得多,因而,微波传感器所获得的图象,空间分辨率较低。这方面的弱点,目前正在用各种相干信号处理技术(如合成孔径技术,相控技术等)进行改进。

现将三种波段的遥感技术的优缺点列表比较如下:

三种遥感技术比较表

波 段	穿透厚云层能力	昼夜都能遥感的能力	空间分辨率	数据(图象)判读的难易
可见光	无	无	高	易
红 外	无	差	高	复杂
微 波	有	有	低	复杂

微波传感器

microwave remote sensor

目前已经实用的最重要的微波传感器是聚焦的合成孔径侧视成象雷达(二维的微波全息传感器)、微波辐射计、微波散射计等。性能更好的微波全息传感器正在探索研究中。见“遥感技术”和“微波遥感技术”。

微波辐射计

microwave radiometer

一个物体,如果它的绝对温度为 T_0 ($T_0 > 0$),表面辐射率为 ϵ ($0 \leq \epsilon \leq 1$),它就会辐射出占据整个频谱且与噪声类似的电磁波。这种辐射称为热辐射。

各种物体的热辐射特性是不同的,这和

物体的绝对温度及表面辐射率有关。一般说来,在一定温度下辐射的电磁能量中,按波长区分,大小是不同的,这就构成了物体的辐射波谱分布。有些物体的辐射波谱为连续波谱,另一些物体的辐射波谱为离散波谱。辐射能量最大的波长称为辐射的峰值波长。物体的绝对温度越高,其辐射的峰值波长越短。

微波辐射计就是一种测量微波波段热辐射的装置。

最早的微波辐射计(1946年)是一种开关式的连续比较法辐射计,称为狄克(Dicke)型辐射计。

现代的微波辐射计是改进的狄克型辐射计,它已广泛地应用在射电天文、大地测绘等领域。

在遥感技术中应用的微波辐射计,大体上由三个部分构成,即狄克型接收机,扫描天线(一般用卡塞格伦式天线)和数据处理设备。其中的数据处理设备可把物体(辐射源)的亮度温度转换成灰度,从而形成图象显示和记录。

微波全息术

microwave holography

微波全息术是在微波波段应用“波前再现”的成像技术。

所谓“波前再现”,就是根据波的干涉原理和衍射原理,先把从物体反射或透射过来的波的等相位面(即波前)记录保存下来,随后在需要时可以设法使被记录的波前释放出,使之再现。

由于经过物体的波前包含着物体的信息,因而完整地记录和保存波前的过程(即把波的幅度和相位都保存下来的过程)就是把物体的信息记录和保存下来的过程。波前再现就是恢复原物体的全部信息。如果再现选择在光波波段,则人们就能看到原物体的形象。

波前记录和再现过程可用下图加以说明。

如图1所示,从微波源发出的波分成两路:一路经过喇叭天线 A_1 照射到物体 B ,经过物体反射后的波称为物波。另一路微波由天线 A_2 发射出去,直接照射到记录平面 P ,称为参考波(基准波)。这个参考波与物波在记录平面 P 上相干涉。把这两个波的干涉图形记录下来就成为微波全息图。由于微波源是相干性很好的相干波源,这两个波的干涉图的结构不但和物波的幅度而且和它的相位有关,这样干涉图就把物波的波前记录下来了。这是微波全息成像的第一步。

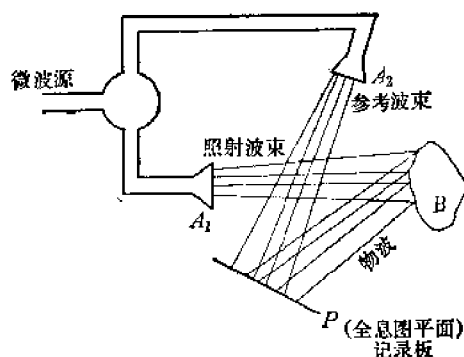


图1 微波全息图的形成

记录微波干涉图形的方法有几种:一种是把微波检波器的二维列阵放在 P 处,然后把检波器的输出电信号转换成光信号,再用照相记录。也可以用一个扫描检波器来代替二维列阵,让它移动通过所有必须抽样的位置,将检波器在每一抽样位置时的输出经过放大后在阴极射线管的荧光屏上显示出来,并用照相记录。如果物体是运动的(有规则的移动或转动),也可以利用合成孔径技术。也有人用液晶显示装置,用液晶随温度而改变颜色的特性来显示微波干涉场强。

再现时,可用另外一个参考波来照射全息图(见图2)。这个参考波也必须具有好的相干性。通常为了获得可见象,一般都用相干光(激光)再现。这时,原来的微波全

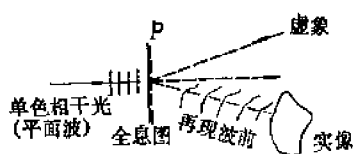


图2 光学再现

息图应该按照两个波长的比例缩小。微波全息图上的干涉图结构将起衍射光栅的作用。相干光经过全息图的衍射将再现原来的物波，人们就看到了原物体的形象。

由于一般稳定的微波源都有很好的相干性，其相干长度要比激光的长得多（长好几个数量级），因而微波全息适宜于远距离成像。另外，微波能穿透厚云层，微波成像还可不受黑夜的限制，因而微波全息术在军事侦察的遥感技术中日益重要。目前已经实用的聚焦合成孔径侧视成像雷达就是一种微波全息遥感器。此外，微波全息在非破坏性探伤、导航、探测地壳应变为地震预报提供资料等方面也有应用的可能性。

微波全息图

microwave hologram

这是指物波和参考波在记录平面上所形成的微波干涉图形。见“微波全息术”。

物波

object wave

在微波全息术中，物波是指微波照射物体后被物体所反射的或透射的并到达记录平面上的波。见“微波全息术”。

参考波

reference wave

在微波全息图形成过程中，直接由微波源发射到记录平面上与物波相干涉的波，称为参考波或基准波。见“微波全息术”。

缩尺因子

scaling factor

在微波全息术中，波前再现往往在波长为 λ_2 的情况下进行，它不等于产生全息图的微波波长 λ_1 。 λ_2 常选择在光波区域（例

如，通常选择 $\lambda_2=0.6328$ 微米，绿光区域）。根据全息图再现和象差理论，如果要获得没有象差的再现图象，必须将微波全息图按两个波长的比例缩小。这个比例 $P=\lambda_2/\lambda_1$ ，称为缩尺因子。

在光波波段再现时，由于 λ_2/λ_1 很小，大约为 10^{-3} 数量级，所以，如果严格按此比例缩小，则所得到的缩尺全息图，以及相应的再现图象将会小到无法实际应用。所以，一般只能选择近似的缩尺因子，再现的图象就难免有些象差。如何适当的选择缩尺因子并用适当的光学系统来纠正象差，这是实际工作中需要解决的问题。

光学再现

optical reconstruction

用激光照射缩尺后的微波全息图，再现原来形成干涉图形的物波的波前，因而使人们能逼真地看到原物的形象，这个过程称为光学再现。

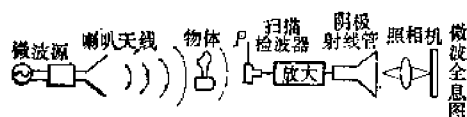
光学再现时，微波全息图将起衍射光栅的作用，单色相干光经过全息图衍射后，产生的光场是三个分量的叠加，详见“微波全息术”的图2。图中，中间一个分量的传播方向与参考波完全一致，它不参与信息传递，但会造成一些有害的杂散光。上面一个分量与原来的物波波前完全一样，它是从全息图辐射出来的，表示原物体的一个虚象。下面一个分量则代表一个实象。

单波束微波全息术

single beam microwave holography

如下图所示，把微波源所产生的微波能量，通过喇叭天线，向着物体所在的方向辐射出去，成为单一的波束，不分成两支。在记录平面 P 处，存在着二次波和一次波的干涉电场。其中的一次波是微波中的非衍射部分，相当于双波束全息术中的参考波。用检波器扫描这个干涉电场，将检波器的输出信号放大后加在阴极射线管的 Z 轴上进行辉度

调制, 这样就在荧光屏上描绘出电场强度分布, 把它记录在照相胶片上就得到了微波全息图。再用相干光去照射全息图, 在适当的光学系统下便可观察到物体的实象和虚象。这种技术即称为单波束微波全息术。



单波束微波全息图的形成

这种单波束微波全息术相当于光全息术发展历史中的最早实验技术, 称为同轴全息术。这种方法的优点是装置简单。缺点是在波前再现时, 虚象和实象难于分开, 互相干扰, 很不清晰, 现在一般都不采用这一途径。

双波束微波全息术

double beam microwave holography

这是指把微波源分成两路 (两个波束) 去形成微波干涉电场的全息术。其中一个波束去照射物体, 另一波束作为参考波。

采用这种方法时, 参考波和物波之间要形成一定的角度。如果把物波传播的方向作为基准轴, 则参考波是离轴的, 或者说是斜射的。所以这种方法又称为“离轴全息术”, 或“斜射参考波法”。这个方法的优点是免除了虚象和实象以及直接波的互相干扰, 它在1962年提出并获得成功后, 大大地促进了全息术的发展。

离轴微波全息术

off-axis microwave holography

见“双波束微波全息术”。

数字微波全息术

digital microwave holography

这是指利用数字电子计算机产生微波全息图和波前再现的技术。

计算机产生全息图一般包括以下两个主要步骤: (1) 设计一个物体的数学模型, 并且计算由这个物体所产生的微波在全息图平面处的波前, 或计算它与参考波相干涉后的

微波干涉场的结构。(2) 把上述计算结果显示出来, 并把这种显示记录在照相胶片上或其它材料制成的薄片上。这种胶片或薄片当用参考波照射时, 必须能实现波前再现。

计算机再现一般可以这样来实现: 用一个微波检波器在全息图平面处进行逐点扫描, 把所得的信号数字化后直接送入计算机进行必要的计算来再现原来的物体。再现的物体可以显示在阴极射线管上或其它显示器件上。

微波计算机

microwave computer

这是一种将微波技术用于电子计算机的新型装置。在近代尖端科学技术中, 计算量大往往是有现有的电子计算机所不能胜任的, 因此, 对计算机的运算速度提出了更高的要求 (即从现有的每秒运算几十万次提高到几百至几千万次)。由于运算器本身的速度代表了计算机的能力, 因而就考虑到从线路技术上来提高运算速度。提高计算机的脉冲重复频率必然要求脉冲变窄, 但是高重复频率的毫微秒视频脉冲又受到了器件频带的限制, 于是, 便提出了在运算电路中应用微波载波技术的设想。

微波计算机中的传输系统可以采用微带, 它所传输的准横电磁波群速度最快 (差不多等于光速), 因而传输时间最少, 系统中可以采用较高的重复频率; 此外, 它的体积较小, 这一点对计算机的设计是非常重要的。

微波在农业上的应用

microwave application in agriculture

微波在农业上的应用目前主要是基于微波的两种效应: 一是利用微波辐射的加热效应; 一是利用微波加速器的电离辐射和 γ 射线等。

在利用加热效应方面, 较为成熟的应用是用微波来烘干谷物 (一般采用S波段10

千瓦的波导型微波加热器，配合热空气对传送带上的谷物进行连续烘干)；此外，利用微波杀虫，在仅约 60℃ 的温度下可以全部杀死谷物中的害虫。其它应用方面的实验还有：微波辐射催芽、微波辐射保护大田农作物不受冷冻、用微波加热使小麦面粉内的 α 淀粉酶钝化以及木材烘干，等等。实验已初步证明有效。

在利用加速器方面，实验表明，加速器所产生的电离辐射可以用来改变植物的遗传特性，得到具有抗锈、抗旱、早熟和不倒伏的良种。关于虫害问题，近年推广的小型土圆仓最适合射线杀虫处理。用 γ 射线处理桑蚕，可增多雄性，获得产蚕率高的品种。

微波在医学上的应用

microwave applications in medicine

微波在医学上主要是应用于对一些疾病，特别是对于癌症的放射治疗。目前一般用电子加速器产生的电子或 γ 射线来治疗，其缺点是癌区以外受到剂量损伤。新的方案是利用微波中能加速器产生的 π^- 介子进行放射治疗，这种系统对剂量的监测与控制较易掌握。此外，正在开展利用高能质子进行治疗的研究。

微波的选择加热方法（即有选择地加热于人体不同部位），也可望同其它方法（如化学疗法）结合用于脑瘤的辅助治疗。

此外，某些药品和手术用的羊肠线等，不能用高温灭菌消毒，化学灭菌处理也不彻底，而用微波加速器的强 X 射线灭菌则很彻底。用射线还可以改变微生物细菌的遗传特性，培养有用的良菌种。

微波对人体辐射，能量可深入皮下组织，加刷新陈代谢，有利于人体创伤的愈合和增强抵抗能力。微波热疗已证明对关节炎和风湿症有效。在输血前用 S 波段 1 千瓦的微波炉对血液加温，可以加速输血，适应紧急大量输血的需要。

微波加热

microwave heating

目前，微波加热在工农业、医学和科学研究特别是在工业加工方面，已经获得广泛应用。

微波加热实质上是一种介质加热，其特点是被加热体表里同时加热，同时由于微波产生的热量与介质性质有关，故微波加热具有选择性。微波加热的优点很多，诸如：加热均匀、加热时间短、产品质量好、较易实现自动控制等。

微波加热通常采用 L、S、C、K 等四个微波波段，用得最多的是 S 波段（2450 \pm 50 兆赫；12.2 厘米）。加热用的微波源主要是磁控管和多腔速调管。微波加热器的类型主要有四种，即驻波场谐振型加热器、行波场波导型加热器、行波场慢波型加热器和辐射型加热器。

微波加热广泛地用于加工工业，包括造纸、纺织、棉布上浆和浸染、橡胶、塑料、胶卷、皮革、烟草、药品等的去湿烘干、涂层干燥、快速粘合和杀菌等。

微波传输太阳能

microwave transmission of solar energy

太阳能既无污染又取之不尽，因此目前已建造了不少太阳灶和太阳加热器。利用太阳能进行发电的问题也引起重视。但是目前使用太阳能还只局限在地面上，存在着能量密度低、受气候影响、日照时间短等缺点，因而人们设想用卫星收集太阳能的方法。

将卫星收集到的太阳能传送到地面，最好的工具是微波。实验表明，最好采用 10~30 厘米波长的微波。10 厘米的微波，穿过电离层的衰减小于 1%，穿过毛毛雨衰减 2%，即使穿过每小时 33 毫米的中等雨量也仅衰减 6%。

微波传输太阳能的过程大体如下：向太空发射一大型太阳能电池的天线阵，它把收

集到的太阳能转换成电能,由微波功率发射器件用微波向地球发射,地面站把接收到的微波进行整流,变成直流功率并引向高压直流输电网络,或变成工业用低频交流电。

太阳能电池可采用硅或砷化镓单晶。功率发射器件的结构类似于磁控管。地面站接收天线可采用肖特基势垒二极管。

为了实现微波传输太阳能,需要解决若干重大的技术关键,包括:把巨大的天线送至太空并在轨道上安装,避免天线受到辐射影响以及避免遭受小行星撞击而造成损坏等等。

微波在化学和化工上的应用

microwave applications in chemistry and chemical engineering

微波在化学上的应用目前还处于探索阶段。“高温化学反应”是已提出的主要研究课题之一。另一课题是“微波感应等离子体”。业已发现, S波段 100 瓦的微波功率,在气体压力为 10 托时,气体温度为 700°K ,而电子温度超过 10000°K 。适当气体经微波辐射能产生氢、氮、氧、氯、溴、硼等原子。

在化工方面,微波已获得越来越多的应用,诸如:合成橡胶系统的微波硫化、大型轮胎的微波硫化、用微波测量硫酸铵肥料的含水量、泡沫塑料的微波固化、微波低压放电合成联苯、用微波加热法沉积纤维材料中的染料和整理剂、微波用于印染定色等等。

微波等离子体发生器

microwave plasma-generation

近年来,化学领域的等离子体研究获得了迅速进展。已用气体放电来产生供动力研究、化学合成反应或其它化学处理用的自由基或原子、离子。

一般是用谐振腔来获得等离子体,由于腔体尺寸受到工作频率设计标准的限制,所能获得的等离子体容量最大不过 50 立方厘米

左右。

最近,已制造出一种新型大容量等离子体发生器,它的结构特点主要是使用了微波慢波结构。在 S 波段 2.5 千瓦功率下,可获得 1000 立方厘米以上的等离子体。增加慢波结构长度,或者同时从两个或更多方向把微波能量馈入大直径反应器,或在较低频率下工作,则可获得更多的等离子体。

等离子体的用途包括在纺织化学领域进行某些有机合成反应和表面反应,作为光源激励激光器等。

微波波谱学

microwave spectroscopy

和光谱学的任务相比,无线电波谱学是研究各种物质的电磁场辐射与吸收谱,即研究在哪些频率上在某种物质中将产生电磁场能量的辐射与吸收,以及能量的频谱分布情况。因为波谱的频率与原子和分子的能级直接有关,而后者又决定于它们的结构,因此通过波谱的研究来认识物质本性是近代物理学中的一个重要途径。

频率稳定度极高的分子振荡器,以及精确的时间标准“分子钟”和“原子钟”就是在波谱分析的基础上制成的。光学用的分光镜只能在可见光频率范围内研究光谱,仅仅这一点还是不够的,因为在某些情况下原子和分子吸收和辐射电磁波的频率下限位于微波的频率范围内。在研究重分子时,因其波谱位于毫米波范围,故需用工作在毫米波段的无线电分光镜。

微波气象学

microwave meteorology

微波气象学是利用微波在大气中的传播特性来研究气象因素和对流层中各种过程,及对流层中与气象学有关的各种物理参数。微波气象学的研究对于气象预报、通信、测位、雷达以及科学研究等都具有实际意义。

微波天文学

microwave astronomy

在无线电天文学诞生以前，人们对地球大气层外宇宙的了解是借助于穿到地球表面上的可见光范围内的电磁波辐射。微波技术的发展为无线电天文学开辟了广阔道路。研究天体在无线电频率范围内的辐射，使人们对天体性质有更多了解，从而有可能发现新的天文现象甚至发现新天体。

在研究冷的宇宙目标方面，无线电天文学的优点尤为明显，因为随着温度的降低，光波辐射强度按温度 5 次方减弱，而无线电波仅按 1 次方减弱。通过微波天文学方法能探测到天体内部，而从可见光辐射只能得到天体的表面材料。

无线电天文学有两种系统，一种是利用接收到的天体辐射，另一种是从地球上发射出无线电波，然后接收从天体反射回来的波。

射电天文学

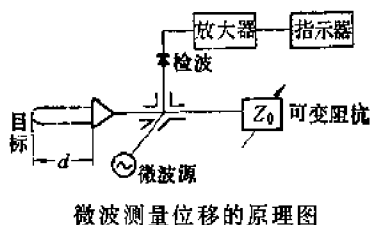
radio astronomy

即“微波天文学”。

微波测位移系统

microwave displacement measuring system

利用由测量目标反射回来的波与向目标发射波之间的相差，即可测出不大于一个波长的位移。这种仪器主要用来检查机械工业中机器、零件等的微小位移。下图示出微波测量位移的原理图。



该系统实质上是一个微波电桥。测量过程如下：先在标准距离下调节电桥（调可变阻抗）达到平衡，指示器无输出。测量时，

如果目标有位移（即 d 变化），电桥便失去平衡，经检波、放大到指示器就有输出，输出大小即反映位移的大小。

微波厚度仪

microwave thickness gauge

这是一种用来测定物体厚度的仪器，其作用原理如下：微波源发出微波信号，一路直接送到相位计，另一路经被测物送到相位计，被测物改变了第二路的行程，从而使二路波产生相位差，用相位计测出相位差的大小从而确定被测物的厚度。

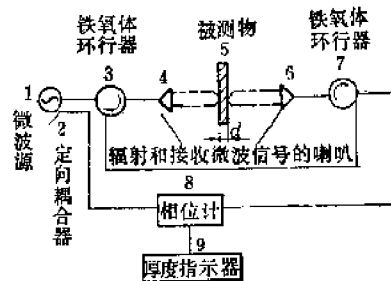


图1 微波厚度仪方框图

在图1中，微波源1产生的微波信号，一路经定向耦合器2直接进入相位计8，一路经环行器3至喇叭4投射到被测物5（如钢板）并由其反射再进入喇叭4，再经环行器3到环行器7，至喇叭6投射到被测物又反射回来，经过6和7进入相位计8。二路行程差取决于被测物的厚度，用相位计测出二个波的相位差即能确定被测物的厚度 d 。

另一种测厚仪是半开放谐振腔，利用谐振频率随被测物厚度的变化来测量其厚度。这类测厚仪的原理如图2所示。

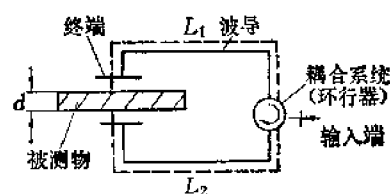


图2 半开放式测厚仪的原理图

微波信号自输入端输入经环行器耦合至

波导, 然后再传送至终端。波经被测物反射回环行器又进入另一波导, 到达终端后经被测物反射回来再进入环行器, 这样就构成了谐振回路。谐振频率取决于路程长度 L_1 和 L_2 , 而 L_1 和 L_2 则由被测物的厚度 d 决定。于是, 测出谐振频率的变化即可测出厚度 d 。

以上两种结构的厚度仪要求被测物为良导体, 以便有效地反射微波, 故适用于金属一类材料的测量。这种测量仪具有以下优点: 设计简单、测量范围大、精度高、测量时与被测物的化学成分无关、响应时间短、成本低。

微波测温计

microwave pyrometer

由特种材料制成的微波谐振腔放在熔炉内, 通过测量其谐振频率来测量熔炉里的温度。

这种测量仪器的优点是: 能耐高温往复循环, 不受辐射的影响, 但响应时间长。

微波穿透深度

depth of microwave penetration

微波照射材料, 规定穿透深度为材料表面到材料内部某点的距离。在这点上, 电磁波的能量密度为表面能量密度的 $1/e$ (也即 36.8%)。亦即微波照射到材料内部, 其能量经过损失了只剩下 63.2% 的点到材料表面的距离。

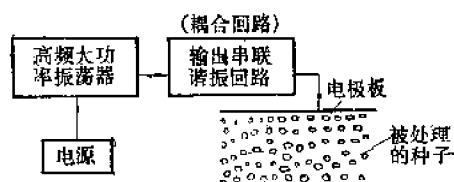
良好的介质能全部或大部分传播微波能量而吸收很少; 良好的导体能全部或大部分反射微波能量, 吸收也很少; 有一定的导电率的吸收性介质 (例如含水物质), 能吸收微波能量, 故微波能在其中传播随深度 (距离) 而衰减。

高频电场种子处理机

seed processing equipment using high-frequency electric field

这是一种利用大功率高频振荡器产生的较强电场的能量来对种子进行一定方式的处

理, 从而达到促进发芽、杀虫、灭菌等目的的设备。其原理如图所示。把振荡频率提高



到 300 兆赫以上则为微波育种, 我国黑龙江、浙江、山西、河北等省已有微波育种设备和做过微波育种试验, 一般都达到早发芽, 发芽率高 (尤其对发芽率低的种子影响更显著), 发芽势强, 出土早, 长大后株壮, 实多, 抗病, 提前成熟, 增产等效果。

被处理的种子像电容器中介质一样, 电极板中电场可以是均匀的或加速的, 电场强度, 频率和功率视被处理的种子的品种、含水量、播种地区不同而异。种子多时可用传送带传送以提高处理速度。

微波输电

microwave power transmission

这是传输电能的一种方法, 即利用微波天线经过空间向远处另一接收天线传送。

微波生物效应

microwave biological effect

这是指微波辐射在生物上的部分或全部时产生的各种影响。主要为微波对介质作用产生的热效应。其次为体内电解质溶液中离子受微波场作用交变移动 (振荡) 发热及体内某些导电液体局部感生涡流发热。

微波对生物的热效应可用来作为理疗的手段, 如处理失当也会引起组织过热产生损伤及功能损害。

微波水份测定仪

microwave moisture meter

也称微波湿度计。水在厘米波段的损耗角正切和介电常数比大多数干物质高得多。在常温下, 当频率在 1000~30000 兆赫范围

时, 水的介电常数为 40 到 80, 损耗角正切为 $0.15 \sim 1.2$, 而大多数干物质介电常数为 1 到 5, 损耗角正切为 $0.001 \sim 0.05$, 这一差别表示, 当微波通过含水物质时, 由水份引起的微波能量的损失远大于干物质引起的损耗, 因此含有水份的物质所吸收的微波能量多少就可以用来表示该物质的湿度。

微波水份测定仪就是利用各种物料因含水份不同而对微波能吸收程度不同, 通过测量出微波能量被物料吸收衰减后的剩余值来确定物料的含水量的仪器。

根据微波通过物料中的波型不同, 微波水分仪可以分为空间波水份仪、波导型水份仪以及表面波水份仪等。

微波水份仪可以测定各种含水量极高的固体或液体的物料的湿度, 例如粮食、木材、铸砂、煤、棉纱、纸张、石油等等, 与电阻法、电容法水份仪相比, 它具有以下优点: 测量精度高、测量迅速、使用范围广、测量代表性好、适于自动控制调整系统以及对样品无污损破坏等。

微波加速器

microwave accelerator

加速器是用来加速荷电粒子(电子、质子等)的设备。微波加速器是指在这种加速器中, 将微波频率的能量同步地交付给荷电粒子, 从而将荷电粒子加速。

加速器在医学、物质结构研究、超微波产生等方面有着重要的应用。

加速器可以分为圆的和直的两大类。从电动力学的角度看, 两类加速器的主要区别在于: 在圆的加速器(如回旋加速器、同步加速器)中, 利用了磁场将粒子的运动轨道近似地弯成圆形; 而在直的加速器(即直线加速器)中, 荷电粒子是沿直线运动的(这种加速器虽然也利用了磁场, 但其作用只是为了产生一种纵向场, 以便维持粒子在直线上运动)。

高能加速器

high-energy accelerator

高能加速器是用来研究高能物理(基本粒子)的一种微波加速器。对原子进行的各种物理实验, 所涉及的能量从几个电子伏到几千电子伏; 原子核所涉及的能量是在几百万电子伏的量级; 而到了基本粒子, 则所涉及的能量一下便跃升几十甚至几百亿电子伏的量级。因此, 高能加速器应能产生具有这一量级的能量的荷电粒子。

高能加速器的型式可以是圆的, 也可以是直的。由于要求能量很高, 故高能加速器常由多个加速器组合而成。例如, 从离子源射出的质子, 经过倍压加速器加速, 进入质子直线加速器后又一次加速, 然后进入小同步加速器, 再进入大同步加速器, 最后产生高能粒子。

近年来, 曾提出过若干新的加速原理, 例如“集团加速”, 方法是将一个密集的电子环连同它所俘获的离子作为一个整个集团来加速。另一种设想是利用激光加速。

粒子加速器

particle accelerator

带电粒子加速器(简称加速器)是利用高频电场(微波)与磁场使带电粒子(如电子、质子及其它重离子)加速而获得能量的装置。它所产生的射束定向性好, 能量便于控制, 所以可用作放射线源。

加速器分为低能量的直线加速器(高压直线加速器和微波直线加速器)和高能量的圆形加速器(磁感式加速的 γ 加速器、高频电场加速的回旋加速器及同步加速器)。

加速器最初主要用于医疗方面, 如治疗癌症和利用加速器产生放射性同位素做诊断、分析和治疗。

近年来, 在辐照化学和无损探伤方面的应用, 也受到人们的重视。

例如在辐照化学工业, 提高塑料的质量,

促进化学反应的加强, 加速器做为电子辐照设备来应用。最近金属工业和汽车制造业也用加速器来固化表面涂覆, 代替一般干燥设备。

利用加速器做无损探伤, 可检查厚度100~500毫米钢板的产品, 因而可以显著提高产品的可靠性, 和使用也很安全。

加速器广泛应用于活化分析, 例如用中子激活样品后, 可以根据活化样品的放射性精确地、快速分析被测样品的成分。它特别适用于冶金、地质、石油勘探中的分析和测量工作。加速器也可用作半导体离子注入工艺。

加速器还可用于农业的辐照育种和品种改良。经辐照处理的种子, 如水稻和小麦等优良品种, 比原品种平均增产20%左右。

此外, 亦可用于食品的辐照处理, 如用于粮食的杀虫, 抑制马铃薯发芽, 鱼虾肉类、水果蔬菜的保鲜防腐。

在医学方面, 从临床实践看来, 用加速器治疗癌病和其它特殊病例, 效果也良好。

微波直线加速器

microwave linear accelerator

这是利用超高频电磁场在盘荷波导中的行波来实现加速电子的装置, 利用谐振腔内电磁场的驻波可以用来加速质子。

微波直线加速器已用在工业射线摄影、医疗及辐照化学中。常用的工业装置一般在15兆电子伏以内。

回旋加速器

cyclotron

这是利用射频电场在直流控制磁场中加速质子、氘核、氦核或其它重粒子的装置。工业生产的装置主要具有交变梯度的等时性回旋加速器。它具有尺寸较小、能量可变、流强较大、并可加速多种粒子等特点, 作为重粒子加速装置已得到了较多的应用。

回旋加速器主要用来生产放射性同位

素, 供各技术部门使用, 尤其是生产用于医疗的短寿命放射性同位素, 供分析、诊断和治疗之用。

微波理疗机

microwave therapeutic apparatus

这是一种利用微波能量对人体的热效应, 使治疗部位组织的温度上升, 促进其血液循环, 增强新陈代谢从而达到治疗目的的机器。

与红外线理疗机、超短波理疗机相比, 微波理疗机有以下几个优点:

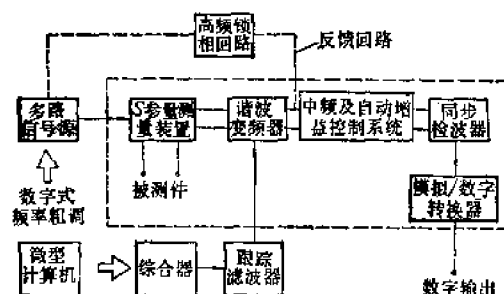
1. 更深的穿透力。
2. 用各种形式的辐射器把能量聚集成束, 对不同部位照射, 且其间可有一定距离, 故使用方便, 可使用于人体各个部位。
3. 体内水份吸收微波能量比超短波大数百倍, 故微波治疗加速血液循环, 疗效高。
4. 脂肪、肌肉、皮肤等各处热效应近似相等, 无过热或受热不足现象。

微波理疗机可治疗神经痛、慢性风湿症、关节炎、神经炎、蜂窝组炎、下肢溃疡、便秘、前列腺肥大、高血压、挫伤、冻伤、硬伤、骨折、腰痛、皮炎、脓疾患等。

微波自动网络分析仪

microwave automatic network analyzer

自动网络分析仪是在网络分析仪的基础上, 配以微型计算机构成的。其方框图如下图所示。



微波自动网络分析仪原理方框图

由于采用计算机控制, 提高了测试速率,

这对相控阵雷达的组件测试极为有利。此外该仪器还可用于天线、晶体管、集成电路、介质材料的测试等。

微波综合器

microwave synthesizer

微波综合器(或相干微波综合器)是微波自动测量系统中不可缺少的一种信号发生器。它可以工作在一个固定频率,也可以扫频方式工作。这种仪器的特点是闭环锁相控制。也就是用手旋转开关,选择所需的测试频率(点频测量),或者用计算机控制,以二进制方式选择所需的扫频频段(扫频测量),以高分辨率的二进制数字形式输出测试信号。比较器连续地监视此二进制数字形式的输出信号,当其与所要求的信号不同时,则比较器输出一个信号至控制电路,使综合器锁相到所要求的频率。

波导不均匀测试仪

set for measurement of discontinuity in waveguide

微波中继通信设备中采用的长波导(例如馈线),如果它们是不均匀的,就会引起传输信号反射,从而引起交调失真,使通信电路产生噪声。波导不均匀测试仪能准确地测量波导中产生反射的大小和不均匀的位置。

波导不均匀性测试仪的测量原理和雷达原理相似,可以是脉冲的,也可以是调频方式工作。反射回来的脉冲信号显示在示波器

上,由此确定不均匀点的位置及其反射的大小。其实现方法有:脉冲反射法、调频反射法、窄带时域反射法等。其原理图见附图。

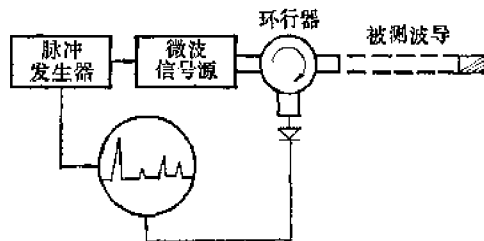


图1 脉冲反射法波导不均匀测试仪原理方框图

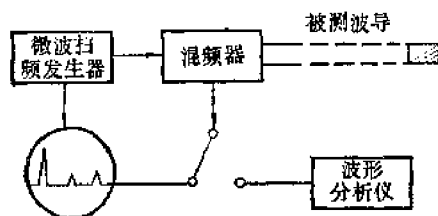


图2 调频反射法波导不均匀测试仪原理方框图

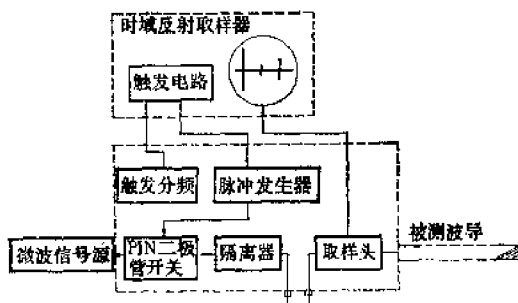


图3 窄带时域反射法波导不均匀测试仪原理方框图

英文索引

- | | | | |
|--|-------|--|-----------|
| A | 页码 | double T | 25-27 |
| aluminum elliptic flexible waveguide | 25-15 | dual mode reciprocal ferrite phase shifter | 25-38 |
| analog type ferrite shifter | 25-37 | E | |
| attenuation of the feed line system | 25-5 | echo-resonator | 25-18 |
| B | | edge-guide mode device | 25-40 |
| balun | 25-35 | eigen-value problem | 25-7 |
| band-splitting filter | 25-43 | electromagnetic scaling law | 25-8 |
| bandwidth of transmission line | 25-5 | elliptic flexible waveguide | 25-15 |
| breakdown | 25-5 | elliptic-rectangular waveguide transducer | 25-23 |
| broadband directional coupler | 25-30 | F | |
| broadband filter and phase shifters | 25-35 | Faraday rotation isolator | 25-44 |
| C | | feed line | 25-10 |
| cavity controlled oscillator | 25-45 | fence waveguide | 25-16 |
| ceramic waveguide | 25-13 | ferrite isolator | 25-44 |
| circulator network | 25-41 | ferrite limiter | 25-44 |
| circular waveguide | 25-11 | ferrite reflective switch | 25-44 |
| coaxial cavity resonator | 25-19 | ferrite switch | 25-26 |
| coaxial line power divider | 25-28 | field-displacement isolator | 25-44 |
| coaxial line of unusual cross-section | 25-17 | folded magic T | 25-27 |
| coaxial transmission line impedance transducer | 25-32 | G | |
| coaxial-waveguide transducer | 25-23 | generalized boundary condition | 25-7 |
| conformal mapping | 25-8 | geometrical theory of diffraction | 25-8 |
| convoluted flexible waveguide | 25-14 | Green's function dyadic | 25-7 |
| corner waveguide | 25-12 | Gunn diode oscillator | 25-40 |
| corrugated elliptic waveguide | 25-15 | Gunn oscillator | 25-44, 45 |
| corrugated waveguide | 25-12 | H | |
| coupled-mode theory | 25-9 | harmonical pumped frequency converter | 25-39 |
| cyclotron | 25-55 | helical circular waveguide | 25-15 |
| D | | helical waveguide | 25-12 |
| depth of microwave penetration | 25-53 | Helmholtz's theorem | 25-7 |
| dielectric-coated waveguide | 25-12 | hermetic window | 25-22 |
| dielectric impedance transformer | 25-33 | high-energy accelerator | 25-54 |
| dielectric lined circular waveguide | 25-16 | high order mode filter | 25-43 |
| dielectric resonator | 25-19 | H-waveguide | 25-16 |
| dielectric slab phase shifter | 25-36 | I | |
| digital latching ferrite phase shifter | 25-37 | impedance transformer | 25-31 |
| digital microwave holography | 25-49 | insertion loss | 25-5 |
| diode waveguide switch | 25-42 | interlocked flexible waveguide | 25-14 |
| directional coefficient of directional coupler | 25-30 | irregular waveguide | 25-11 |
| directional coupler | 25-9 | isolation | 25-5 |
| disc waveguide | 25-12 | L | |
| dispersion | 25-6 | linear impedance transformer | 25-34 |
| double beam microwave holography | 25-49 | | |

M

magic T	25—27
magnetic tuned filter	25—44
match	25—3
matching element	25—25
method of moment	25—8
microstrip attenuator	25—24
microstrip ferrite four-port circulator	25—36
microstrip line directional coupler	25—30
microstrip line impedance transformer	25—32
microstrip power divider	25—28
microwave	25—1
microwave accelerator	25—54
microwave application in agriculture	25—49
microwave application in chemistry and chemical engineering	25—51
microwave application in medicine	25—50
microwave astronomy	25—52
microwave attenuator	25—24
microwave automatic network analyzer	25—55
microwave biological effect	25—53
microwave component (device)	25—22
microwave computer	25—49
microwave delay equalizer	25—42
microwave displacement measuring system	25—52
microwave ferrite circulator	25—41
microwave filter	25—34
microwave heating	25—50
microwave hologram	25—48
microwave holography	25—47
microwave interdigital structure	25—35
microwave linear accelerator	25—55
microwave low-noise parametric amplifier	25—39
microwave meteorology	25—51
microwave mixer network	25—40
microwave moisture meter	25—53
microwave optics	25—1
microwave phase shifter	25—36
microwave plasma-generation	25—51
microwave power transmission	25—53
microwave propagation in atmosphere	25—2
microwave pyrometer	25—53
microwave radiometer	25—46
microwave remote sensing technique	25—46
microwave remote sensor	25—46
microwave solid-state oscillator	25—44
microwave spectroscopy	25—51
microwave synthesizer	25—56
microwave theory of phased-array antenna	25—8
microwave therapeutic apparatus	25—55
microwave thickness gauge	25—52
microwave transistor oscillator	25—39

microwave transistor power amplifier	25—39
microwave transmission of solar energy	25—50
millimeter integrated circuit	25—40
moving standing wave	25—3
moving wave	25—2
multi-mode cavity filter section	25—35
multiple-mode (microwave) network	25—40

N

null point seam flexible waveguide	25—14
------------------------------------	-------

O

object wave	25—48
off-axis microwave holography	25—49
open cavity	25—20
open resonator	25—20
open waveguide	25—16
optical reconstruction	25—48
over-mode microwave filter	25—36

P

particle accelerator	25—54
periodic structure	25—17
plated dielectric waveguide	25—15
power carrying capacity of transmission line	25—5
power divider	25—27

Q

quarter wavelength impedance transducer	25—31
---	-------

R

radio astronomy	25—52
rectangular-circular waveguide transducer	25—22
rectangular flexible waveguide	25—13
rectangular waveguide	25—10
rectangular waveguide impedance transducer	25—31
rectangular waveguide switch	25—26
reference wave	25—48
reflection coefficient	25—2
remote sensing technique	25—46
resonator	25—18
resonator cavity	25—18
ridge waveguide	25—13
rotary joint	25—24
rotating joint	25—24

S

scaling factor	25—48
seamless corrugated waveguide	25—14
seed processing equipment using high- frequency electric field	25—53
semiconductor junction device package network	25—41
set for measurement of discontinuity in waveguide	25—56

short circuit plunger	25—25	travelling wave	25—2
side-coupled cavity	25—21	travelling wave coefficient	25—2
side flow	25—6	twisted waveguide	25—11
single beam microwave holography	25—48		
small diameter flexible waveguide	25—13	U	
standing wave	25—3	up-converter	25—39
static Green's function	25—7	V	
stepped impedance transformer	25—33	vector Helmholtz equation of the	
strip line and microstrip	25—17	electromagnetic field	25—6
submillimeter wave	25—1	voltage standing wave ratio	25—3
superconductor cavity	25—20	W	
surface acoustic wave device	25—38	waveguide	25—10
		waveguide bend	25—11
T		waveguide corner	25—11
T-connector	25—26	waveguide hybrid ring	25—29
telescopic waveguide	25—13	waveguide junction circulator	25—42
theory of image	25—8	waveguide match load	25—25
three dB directional coupler	25—28	waveguide simulator	25—38
three dB slot bridge	25—28	wave mode	25—5
transit attenuation of directional coupler	25—30	wave mode transducer	25—28
transmission line choke	25—22		